



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA
SECCIÓN POST - GRADO



**MODELOS DE MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO
DE EQUIPOS EN MINERÍA SUPERFICIAL**

TESIS

PRESENTADO POR:

OSCAR ELOY LLANQUE MAQUERA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA DE MINAS**

LIMA - PERU

1999

INDICE

	Pag.
CARATULA	I
AGRADECIMIENTO	II
INDICE GENERAL	III - VIII
INDICE DE CUADROS	IX - X
INDICE DE GRAFICOS	XI - XII
RESUMEN	XIII - XIV
CONCLUSIONES	XV - XVII
RECOMENDACIONES	XVII - XIX

CAPITULO I

CRITERIOS GENERALES DE REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS

1.1	Introducción	
1.2	Hipótesis	
1.3	Objetivo de la tesis	
1.4	Justificación y alcance	
1.5	Causas y factores de reemplazamiento	
	1.5.1 Causas	
	1.5.2 Factores	
	1.5.3 Criterios generales	6
	1.5.4 Factores de análisis económico	
1.6	Modelos de investigación	
	1.6.1 Modelo	
	1.6.2 Clases de modelos	9

CAPITULO II

MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA EN MINERIA

2.1	Mantenimiento	11
2.2	Tipos de mantenimiento	12
2.2.1	Mantenimiento correctivo	13
2.2.1.1	Ventajas del mantenimiento correctivo	15
2.2.1.2	Desventajas del mantenimiento correctivo	15
2.2.2	Mantenimiento preventivo	17
2.2.2.1	Mantenimiento preventivo programado	18
2.2.2.2	Distribución de la intensidad de avería de un equipo	19
2.2.2.3	Volumen óptimo de mantenimiento preventivo	22
2.2.2.4	Ventajas del mantenimiento preventivo	23
2.2.2.5	Desventajas del mantenimiento preventivo	24
2.2.2.6	Relación entre los recursos y el rendimiento	25
2.2.3	Mantenimiento predictivo	27
2.2.3.1	Volumen de variables a controlar en mantenimiento predictivo	27
2.2.3.2	Selección de sistema por orden de prioridad	28
2.2.3.3	Modelos básicos de mantenimiento predictivo	29
2.2.3.4	El diagnóstico técnico en mantenimiento predictivo	31
2.2.3.5	Selección de técnicas de diagnóstico	32
2.2.3.6	Método de diagnóstico	33
2.3	Planificación y programación como gestión de mantenimiento	43
2.3.1	La planificación en el mantenimiento	44
2.3.2	Objetivos y estrategias del ejercicio en mantenimiento	48
2.3.3	Establecimiento de planes de trabajo	49
2.3.4	La programación en mantenimiento	50
2.4	Organización del departamento de mantenimiento	51
2.4.1	Infraestructura y recursos de mantenimiento	52
2.4.1.1	Instalaciones fijas para mantenimiento	52

2.4.1.2	Instalaciones móviles para mantenimiento	55
2.4.2	Personal de mantenimiento	56
2.4.2.1	Formación del personal de mantenimiento	58
2.4.2.2	Incentivos y primas para el personal de mantenimiento	58
2.4.3	Relación de mantenimiento con otras dependencias	59
2.4.3.1	Relaciones con la dirección	59
2.4.3.2	Relación con operación y planificación	59
2.4.3.3	Relación con el departamento de logística	60
2.4.3.4	Relación de mantenimiento con el departamento de relaciones industriales	61
2.4.3.5	Relaciones con organizaciones externas	62
2.4.4	Organigrama del departamento de mantenimiento	62
2.5	Indices de control de mantenimiento	64
2.5.1	Indices ligados a la producción	65
2.5.1.1	Disponibilidad	65
2.5.1.2	Utilización	66
2.5.1.3	Rendimiento	66
2.5.1.4	Aprovechamiento	67
2.5.2	Indices estructurales	67
2.5.2.1	Costos mantenimiento - producción	67
2.5.2.2	Costos de mantenimiento contratado	67
2.5.2.3	Costos de mantenimiento propio	67
2.5.2.4	Recursos humanos	68
2.5.2.5	Rendimiento del recurso humano en mantenimiento	68
2.5.2.6	Trabajos de conservación efectuados por producción	69

CAPITULO III

REEMPLAZAMIENTO DE MAQUINARIA

3.1	Introducción	70
3.2	Modelos de reemplazamiento	72

3.3	Tiempo óptimo de reemplazamiento para equipos cuyos costos de operación incrementan con el uso – Método I	73
3.3.1	Definición del problema	73
3.3.2	Construcción del modelo	73
3.3.3	Ejemplo aplicativo	75
3.4	Tiempo óptimo de reemplazamiento para equipos cuyos costos de operación incrementan con el uso – Método II	79
3.4.1	Definición del problema	79
3.4.2	Construcción del modelo	79
3.4.3	Ejemplo aplicativo	80
3.4.4	Comentarios adicionales	81
3.5	Modelo de reemplazamiento de equipo por el método del costo acumulativo por horas	81
3.5.1	Consideraciones generales	81
3.5.2	Método del costo acumulativo por horas	82
3.5.3	Procedimiento de los cálculos	82
3.6	Modelo de reemplazamiento de equipo por el método de índices de rentabilidad económica	84
3.6.1	Consideraciones generales	84
3.6.2	Estimación del valor residual de un equipo	84
3.6.3	Financiamiento, amortización e intereses	85
3.6.4	Costo de propiedad de un equipo	86
3.6.5	Costo de operación de un equipo	87
3.6.6	Estimación de la vida óptima de un equipo	88
3.6.7	Estudio de la rentabilidad económica de un proceso de reemplazamiento	89
	3.6.7.1 Reposición de equipos mediante el criterio del VAN con maximización de beneficios	89
	3.6.7.2 Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) sobre el margen del costo de operación en reemplazo de equipos	90

CAPITULO IV

APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS

4.1	Generalidades	91
4.2	Características generales del yacimiento	91
4.3	Situación operacional	92
4.3.1	Equipos empleados de carguío y transporte	92
4.3.2	Equipos empleados de carguío y transporte en la actualidad	92
4.4	Especificaciones técnicas y eficiencias de los equipos en estudio	93
4.4.1	Especificaciones técnicas de los equipos	93
4.4.2	Componentes de los equipos de carguío y transporte	94
4.4.3	Causas de desgaste de los equipos de carga y transporte	95
4.4.4	Vida expectativa de los equipos	97
4.4.5	Costo horario de operación y mantenimiento	98
4.5	Aplicación práctica del modelo de reemplazamiento	100
4.6	Modelos de reemplazamiento de equipos por el método de costo acumulativo por horas	101
4.6.1	Cálculo analítico de reemplazo de la pala P&H 1900-AL.	102
4.6.2	Cálculo analítico de reemplazo del volquete L.H. M-100	105
4.7	Modelo de reemplazamiento de equipo por el método de índices de rentabilidad económica	113
4.7.1	Cálculo analítico de reemplazo de la pala P&H 1900-AL.	113
4.7.1.1	Estimación del valor residual de la pala	113
4.7.1.2	Estimación de la evolución del capital adeudado, amortización e intereses de la pala P&H 1900-AL	114
4.7.1.3	Cálculo del costo de propiedad de la pala P&H 1900-AL	114
4.7.1.4	Cálculo del costo de operación de la pala P&H 1900-AL	115
4.7.1.5	Determinación de la vida óptima de la pala P&H 1900-AL	116
4.7.1.6	Cálculo de reposición de la pala P&H 1900-AL mediante el criterio del VAN, sobre el margen de operaciones	119
4.7.1.7	Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) sobre el margen	

del costo de operación en reemplazo para la pala	122
4.7.2 Cálculo analítico de reemplazo del volquete L.H. M-100	125
4.7.2.1 Estimación del valor residual del volquete L.H. M-100	125
4.7.2.2 Estimación de la evolución del capital adeudado, amortización e intereses del volquete Lectra Haul M-100	125
4.7.2.3 Cálculo del costo de propiedad del volquete L.H. M-100	126
4.7.2.4 Cálculo del costo de operación del volquete L.H. M-100	126
4.7.2.5 Determinación de la vida óptima del volquete L.H. M-100	127
4.7.1.6 Cálculo de reposición mediante el VAN del volquete L.H. M-100	129

BIBLIOGRAFÍA

INDICE DE CUADROS		Pag.
Cuadro No. 1.1	Tipos de modelos y su aplicación	1
Cuadro No. 2.1	Tabla de posibles fuentes de partículas de desgaste según sus elementos químicos	40
Cuadro No. 3.1	Valores óptimos de reemplazo	80
Cuadro No. 4.1	Componentes de la Pala Eléctrica P&H 1900-AL	94
Cuadro No. 4.2	Componentes del Volquete Lectra Haul M-100	95
Cuadro No. 4.3	Resumen de factores de desgaste o fallas Pala P&H 1900-AL	96
Cuadro No. 4.4	Resumen de factores de desgaste o falla Volquete M-100	96
Cuadro No. 4.5	Vida reajustada y expectativa de los componentes de la Pala P&H 1900-AL	97
Cuadro No. 4.6	Vida reajustada y expectativa de los componentes del Volquete M-100	98
Cuadro No. 4.7	Costo horario de operación y mantenimiento de las Palas P&H 1900-AL año 1988	99
Cuadro No. 4.8	Costo horario de operación y mantenimiento de Volquetes L.H. M-100 año 1988	99
Cuadro No. 4.9	Costo promedio de operación y mantenimiento de Palas P&H 1900-AL	100
Cuadro No. 4.10	Costo promedio de operación y mantenimiento de camiones L.H. M-100	101
Cuadro No. 4.11	Valores para obtener la ecuación de regresión lineal para la Pala P&H	103
Cuadro No. 4.12	Valores para obtener la ecuación de regresión lineal para Volquete L.H. M-100	106
Cuadro No. 4.13	Valor residual de la Pala P&H 1900-AL	113
Cuadro No. 4.14	Evolución del capital adeudado, amortización e intereses de la Pala P&H 1900-AL	114
Cuadro No. 4.15	Costos de Operación, Propiedad y producción de la Pala P&H 1900-AL	117
Cuadro No. 4.16	Cálculo del VAN sobre el margen del costo de operación	

	de la Pala P&H 1900 –AL	121
Cuadro No. 4.17	Valores del TIR y TIR corregido sobre el margen del costo de operación	122
Cuadro No. 4.18	Determinación de la frecuencia relativa sobre el margen del TIR corregido	124
Cuadro No. 4.19	Valor residual del Volquete L.H. M-100	125
Cuadro No. 4.20	Evolución del capital adeudado, amortización e intereses del Volquete L.H. M-100	126
Cuadro No. 4.21	Costos de Operación, Propiedad y producción del Volquete L.H. M-100	127
Cuadro No. 4.22	Cálculo del VAN sobre el margen del costo de operación del Volquete L.H. M-100	129

INDICE DE GRAFICOS	Pag.	
Figura 2.1	Distribución esquemática de tipos de mantenimiento	12
Figura 2.2	Modelo de mantenimiento correctivo	13
Figura 2.3	Interpretación del mantenimiento correctivo	14
Figura 2.4	Concepto tradicional del mantenimiento desde el punto de vista De los fabricantes	18
Figura 2.5	Distribución general de intensidad de averías	20
Figura 2.6	Incremento de $Y(t)$ por sobremantenimiento	21
Figura 2.7	Determinación del costo mínimo de mantenimiento	23
Figura 2.8	Relación entre recursos y rendimiento de mantenimiento	26
Figura 2.9	Relación entre efectos y causas de averías	26
Figura 2.10	Volumen de control de un sistema	28
Figura 2.11	Límites de desgaste	30
Figura 2.12	Esquema de métodos de diagnóstico técnico	33
Figura 2.13	Concentración de partículas de desgaste en aceite	39
Figura 2.14	Esquema de métodos básicos no destructivos	41
Figura 2.15	Sistemas de gestión de mantenimiento	46
Figura 2.16	Forma de almacenar información en un archivo histórico	47
Figura 2.17	Vistas de perfil y superior de la nave de reparación de equipos	54
Figura 2.18	Organigrama de mantenimiento por procesos	63
Figura 2.19	Organigrama de mantenimiento por tipo de equipos	64
Figura 2.20	Organigrama de mantenimiento centralizado	65
Figura 3.1	Intervalo de reemplazo de equipos	70
Figura 3.2	Frecuencia de reemplazos	73
Figura 3.3	Intervalo entre reemplazos	74
Figura 3.4	Diagrama de costo de operación Vs. Tiempo	75
Figura 3.5	Tiempo óptimo de reemplazo	78
Figura 3.6	Tendencia del costo total de evaluación	78
Figura 3.7	Ciclo de reemplazo	79
Figura 3.8	Ciclo de reemplazo incluido el tiempo requerido	81
Figura 4.1	Curva de costos de la Pala P&H 1900-AL	110

Figura 4.2	Curva de costos del Volquete L.H. M-100	111
Figura 4.3	Valor residual de la Pala P&H 1900 - AL	118
Figura 4.4	Costo total de producción de la Pala P&H 1900-AL	118
Figura 4.5	Evolución del VAN: margen de operación de la Pala P&H	121
Figura 4.6	Evolución del TIR: margen de operación de la Pala P&H	121
Figura 4.7	Margen del TIR después de su máximo para la Pala P&H	124
Figura 4.8	Valor residual del Volquete L.H. M-100	128
Figura 4.9	Costo total de producción del Volquete L.H. M-100	128
Figura 4.10	Evolución del VAN: margen de operación del Volquete L.H. M-100	130
Figura 4.11	Margen del TIR después de su máximo para Volquete L.H. M-100	130

RESUMEN

El mantenimiento y reemplazamiento de equipos en Minería Superficial tiene una gran importancia por el mismo hecho que se mueven gran volumen de material y por las altas inversiones hechas en maquinaria, a su vez por la influencia en los costos de operación. Por tal razón es el interés en desarrollar los modelos de mantenimiento y reemplazamiento de equipos en minería e implementar el mantenimiento predictivo, como una actividad complementaria a los mantenimientos que se realizan comúnmente como son preventivo y correctivo.

Los equipos en las operaciones mineras, después de muchas horas de trabajo, dependiendo de las condiciones de operación, se deterioran y consecuentemente disminuye su eficiencia. Dicho desgaste en muchos casos conduce a reemplazar el equipo, que posteriormente reducirá los costos de operación.

El presente trabajo, se ha dividido en 4 capítulos, donde se describen aspectos que concierne directamente al proceso de “MANTENIMIENTO Y REEMPLAZAMIENTO” de equipos en minería.

En el CAPÍTULO I, se detallan algunas nociones sobre los **Objetivos de la Tesis**, su justificación y criterios generales de reemplazamiento de equipos; realizándose un análisis de los criterios de reemplazamiento de equipos, asimismo se describen las causas y sus factores.

En el **CAPITULO II**, se ha visto por conveniente desarrollar aspectos fundamentales sobre el **Mantenimiento de Equipo en Minería de Cielo Abierto**, desde un punto de vista conceptual, por la importancia que tienen las actividades destinadas a la conservación de la maquinaria y su influencia sobre los costos y rendimientos durante la vida económica de las mismas. Partiendo de su tipificación, planificación y programación del mantenimiento, para continuar con la estructura organizativa de un Departamento de Mantenimiento, incluyendo algunas ideas sobre los índices de control de mantenimiento.

En el **CAPÍTULO III**, se desarrollan algunos **Modelos de Reemplazamiento de Maquinaria**. Los modelos analizados en este caso son tres: modelo del tiempo óptimo de reemplazamiento para equipos cuyos **costos de operación incrementan con el uso**; modelo del método del **costo acumulativo por horas**; modelo de reemplazamiento de equipo por el **método de índices de rentabilidad económica**. Todos los modelos se basan en la determinación del tiempo óptimo de reemplazamiento en función del costo de operación.

En el **CAPÍTULO IV** se realiza la **Aplicación de los Modelos** descritos en el capítulo III; el ejemplo de aplicación se realiza a los equipos de carguío y transporte, es decir Pala P&H 1900-AL y Volquetes Lectra Haul M-100, equipos que trabajaron en la Mina Cerro Verde de Propiedad Minero Perú en aquel entonces. Los resultados con los modelos empleados para **estimar el tiempo probable de reemplazo**, existe diferencia mínima de una a otro modelo, por el mismo hecho de que usan factores diferentes en cada caso. Finalmente se extrae las principales conclusiones y recomendaciones a las que se han llegado una vez desarrollado las distintas etapas del trabajo.

CONCLUSIONES

1. En las operaciones de minería a cielo abierto, los altos costos de mantenimiento, su tendencia a elevarse y las pérdidas ocasionadas por la baja disponibilidad de los equipos, hacen que el mantenimiento juegue un papel muy importante en la estructura de los costos operativos. Dichos costos elevados se pueden reducir implementando el mantenimiento predictivo; por ello es necesario saber el nivel de calidad y cantidad de mantenimiento que requieren los equipos, a fin de lograr una buena conservación y alta disponibilidad, analizando la rentabilidad de los mismos.
2. La implantación del mantenimiento predictivo en minería, debe permitir investigar las causas de falla, para facilitar y ayudar a su prevención y desarrollar mejoras en la tecnología de los sistemas y componentes de un equipo, utilizando la instrumentación necesaria basada en métodos de diagnóstico y algoritmos que permitan la aplicación en la mayor parte de los casos, de sistemas expertos o técnicas de inteligencia artificial, que puedan reflejar el estado del sistema técnico y predecir la falla antes de llegar al colapso.
3. A medida que transcurre el tiempo, el equipo disminuye su eficiencia en operación, este descenso en la eficiencia lleva como consigo el descenso económico para la empresa; que a posterior obliga ejecutar programas adecuados de mantenimiento y reparación. Por lo cual surge la necesidad de reemplazar el equipo en un determinado tiempo de servicio para que el costo de operación sea aceptable.

4. El mantenimiento se desarrolla en el entorno teórico de la falla o desperfecto, para lo cual se debe prevenir, predecir y corregir; determinando el origen de su desperfecto, para dar una solución y luego prevenirlos en lo posterior para los equipos similares o en operaciones similares.
5. Las causas y factores de reemplazamiento en equipos se consideran como: deterioro físico, avería prematura total o parcial de sus componentes, inadecuado e insuficiente, obsolescencia, capital disponible, factor de inercia, impuesto sobre el ingreso, inflación; así como otros factores y criterios generales relacionados a los aspectos económicos relacionados a la producción.
6. Para determinar el momento del reemplazo de un equipo se relaciona con el tiempo de servicio prestado, teniendo en cuenta para dicha acción una política definida; en lo cual el criterio general es maximizar beneficios y minimizar los costos de operación.
7. Los equipos analizados para el caso del estudio son las palas P&H modelo 1900-AL de 11 yd³ de capacidad y los volquetes Lectra Haul M-100 de 100 T.C. de capacidad, adquiridos por Minero Perú entre los años 1974 y 1975 respectivamente.
8. En la aplicación del modelo del reemplazamiento por el **método del costo acumulativo por horas**, los resultados analizados es como sigue:

Equipo	Costo Mínimo promedio	Máx. de horas trabajadas
Pala P&H 1900-AL	140 US\$/hr. – 12 a 13 años	46,000 hrs. – 13 años
Volquete L.H. M-100	81 US\$/hr. – 9 a 10 años	38,000 hrs. – 10 años

9. En la aplicación de reemplazamiento del equipo por el **método de índices de rentabilidad** , los resultados analizados es:

Equipo	Costo mínimo promedio de trabajo	Máx. de horas trabajadas	VAN mayor	TIR (%) mayor Corregido	Coef. Relativa Marg. TIR
Pala P&H 1900-AL	206,000 US\$/año	52,000 hrs.	11 años	2do. Año	10mo. Año
Volquete	13 a 15 años	14 años			cambia y desciende
L.H. M-100	81 US\$/hr.	44,000 hrs	10 años	3er. año	9no. Año
	10 a 11 años	11 años			cambia y desciende

10. Según los cuadros analizados se sugiere plantear reemplazar para la pala a partir del 13vo. Año, cuando el equipo haya trabajado 46,000 horas y para el volquete a partir del 10mo. Año, cuando el equipo ha trabajado 40,000 horas. En este periodo el costo total de operación es mínimo; el Van y el TIR alcanzan sus valores máximos antes de los años propuestos, pero sus valores siguen siendo rentables para la empresa.

11. Se concluye que el costo total de reemplazo es mucho mayor después de la falla, generando gran pérdida de producción y tiempo; entonces es apropiado realizar el reemplazo preventivo en los años propuestos. En la empresa Minero Perú en ese entonces ya debía de realizarse el reemplazo de los equipos de carga y transporte estudiados.

RECOMENDACIONES

1. Debido a los altos costos de operación y las caídas de los precios de los metales en los mercados internacionales muchas empresas mineras optan por abandonar las minas. Para evitar ello es necesario reducir los costos de operación, prioritariamente implementando un programa de mantenimiento adecuado y reemplazar el equipo en su debido momento.
2. Debido a los costos altos de los equipos para diagnóstico predictivo y la necesidad del personal calificado para operarlos, las empresas mineras no están en condiciones de asumir dichos gastos para adquirirlos. Por tal razón se recomienda adecuar los contratos de mantenimiento y servicio postventa a las necesidades y posibilidades del usuario.
3. Se deben adquirir los equipos de los fabricantes y proveedores que cuenten con instrumentos de diagnóstico técnico de carácter predictivo, dentro del servicio de asistencia y del servicio de postventa.
4. Para obtener los datos de costos que se emplean en los modelos, es necesario realizar un tratamiento estadístico, mediante el análisis de regresión a los datos reales tomados de los archivos históricos existentes en la empresa. Luego estos costos en los modelos, deben relacionarse en función a la edad del equipo, al desgaste físico experimentado con el tiempo en servicio y la calidad y cantidad del mantenimiento asignado.
5. Las empresas mineras deben contar con un método de cálculo que les permita evaluar la rentabilidad económica de sus equipos y determinar el momento oportuno para

reemplazarlos a fin de reducir sus costos de operación, como es el objetivo de la presente tesis.

6. Se recomienda que se realice el reemplazo de los equipos antes que ocurra la falla, ya que el reemplazo después de la falla no se planifica.
7. El nivel del reemplazo preventivo total o parcial debe incrementarse en las empresas mineras.
8. Se recomienda emplear el modelo de reemplazamiento por el método de índices de rentabilidad económica, ya que intervienen más variables para su estimación del periodo de reemplazo
9. La rentabilidad de un equipo debe lograrse desde los primeros años de servicio y durante su vida útil, una vez planteada su reemplazo se tienen en cuenta algunos aspectos básicos a cumplirse, tales como:
 - El período de recuperación del capital invertido en las unidades a reemplazar debe ser menor que el período de sustitución, a fin de lograr una mejor utilización del equipo.
 - El ahorro anual o beneficio potencial del equipo elegido debe de competir ventajosamente frente a otros modelos propuestos.
 - El reemplazo debe estar enmarcado dentro de la política empresarial de la compañía, según sus recursos y reservas, planes futuros y demanda del producto a explotar en el contexto internacional.

CAPITULO I

CRITERIOS GENERALES DE REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La industria minera por su naturaleza de trabajo, requiere de equipos capaces de trabajar en forma continua durante todo el ciclo de vida; con el transcurso del tiempo y uso, además de soportar grandes esfuerzos y de realizar trabajos bajo condiciones rudas y adversas se convierten en inadecuados u obsoletos para cumplir con la demanda de la producción asignada. Considerando que las paradas de los equipos generalmente ocasionan pérdidas en la producción, y para evitar esto es necesario que la disponibilidad de ellas sea la más alta posible.

A medida que transcurre el tiempo de servicio, la eficiencia de operación del equipo descende, aunque las medidas varían dependiendo de las condiciones de trabajo. Este descenso en la eficiencia operativa lleva a un descenso económico, unido a ello el desgaste, por el uso del equipo y sus componentes, que obligan a ejecutar programas adecuados de mantenimiento y reparación de piezas o partes dañadas lo que incrementa el costo de operación, y surge la necesidad de REEMPLAZAR el equipo de forma total o parcial en un determinado tiempo de uso, en el cual el costo de producción sea mínimo.

La ejecución de obras de ingeniería de cualquier campo, que implique la utilización de equipos, requiere por parte del personal que dirige la operación, un perfecto conocimiento de su aplicabilidad y capacidad de rendimiento, requiere también de un criterio real que permita decidir el REEMP O a tiempo de dichos equipos, cuando las condiciones de operación, mantenimiento y rentabilidad a niveles rentables así lo exija.

1.2 HIPOTESIS

En la industria minera, el problema general es mantener un equipo o reemplazarlo con uno que sea económicamente rentable y que tenga un buen índice de productividad.

En el caso de la minería superficial, los equipos de carga y transporte tienen un costo elevado de operación y mantenimiento, éstos se incrementan con el uso del equipo; por lo cual es conveniente plantear modelos adecuados que minimicen el costo de operación y mantenimiento y su influencia positiva sobre los costos de explotación.

Los equipos con el uso se deterioran y el costo de producción se incrementa; por lo tanto es necesario formular un proceso de reposición del equipo, planteando modelos de reemplazamiento basados en la maximización de beneficios o la minimización de costos en función del tiempo de servicio.

1.3 OBJETIVO DE LA TESIS

Dentro de los objetivos principales se pueden mencionar:

- **Determinar los criterios generales del reemplazamiento de equipos en minería, describiendo las causas y sus factores, relacionándolos con el ciclo económico y costos de Operación**
- **Desarrollar conceptualmente los tipos de mantenimiento en mina e implementar el mantenimiento predictivo, como una alternativa para reducir los elevados costos de reparación del mantenimiento correctivo y evitar intervenciones preventivas innecesarias, mediante métodos y técnicas de diagnóstico e inspección no destructivos, que permitan medir el desgaste progresivo de los equipos y sus componentes para aprovechar gran parte de la reserva de uso de los mismos y prolongar la vida útil de los equipos.**
- **Describir los modelos de mantenimiento y reemplazo, que permitan determinar la vida óptima de utilización de un equipo, en función al tiempo de servicio y su rentabilidad económica.**
- **Analizar los modelos de reemplazamiento de maquinaria, para determinar en qué momento se debe realizar el reemplazo de un determinado equipo que está en operación. Los modelos que se analizan están en función al costo de operación del equipo y el tiempo de uso del mismo.**

1.4 JUSTIFICACION Y ALCANCES

El trabajo se centra en el estudio de dos aspectos principales y de gran importancia dentro del sector minero: el de mantenimiento en mina y el período óptimo de utilización de la maquinaria.

Generalmente, en las operaciones mineras a cielo abierto, la conservación de la maquinaria se realiza mediante el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. El primero está basado en intervenciones periódicas según manuales y recomendaciones de los fabricantes y/o según experiencias acumuladas por parte de los usuarios, siempre en función del número total acumulado de las horas efectivas de trabajo de los equipos y sus respectivos sistemas y conjuntos que los componen.

En algunos centros mineros tienen incluidas algunas actividades predictivas dentro del mantenimiento preventivo; pero es muy conveniente implantar el mantenimiento predictivo como tal, dotándole de infraestructura y herramientas apropiadas, para que el departamento de mantenimiento esté en condiciones de realizar el diagnóstico técnico continuo de los equipos y puedan intervenir oportunamente y aplicar la acción preventiva o correctiva, antes que se produzca la avería o el colapso de la maquinaria empleada

De la misma manera, hay un vacío en la unificación de criterios sobre la utilización adecuada de los equipos en minería, aunque depende de muchos factores internos y externos de cada empresa. Nos centraremos en determinar algunos criterios generales de cálculo sobre la vida óptima de un equipo y plantear el reemplazo en el momento oportuno.

1.5 CAUSAS Y FACTORES DE REEMPLAZAMIENTO

1.5.1 CAUSAS

La necesidad o conveniencia de reemplazar un equipo puede deberse a su deterioro físico, o a cambios de necesidad que lo hagan inadecuado, o a adelantos tecnológicos incorporados a nuevos modelos, frente a los cuales el equipo existente resulte en

desventaja. Es cierto que no está bien definido el punto necesario u óptimo para reemplazar el equipo, pero está muy relacionado con el costo de operación.

El incremento del costo de operación está en función al descenso de la eficiencia o rendimiento del equipo, como consecuencia del desgaste experimentado y el respectivo incremento del costo de mantenimiento a medida que aumenta la vida del equipo, favoreciendo la decisión de un reemplazamiento.

En general la necesidad de reposición de un equipo no es la misma que para el resto de la flota, también varía de una empresa minera a otra, de acuerdo a las condiciones de trabajo, volumen de producción, características del producto y del equipo, mantenimiento asignado, etc. se puede considerar las siguientes causas para reemplazar un equipo:

- a) **Deterioro Físico.** Es causado por el uso y/o acción de agentes externos y se traduce en desventaja económica por el descenso del servicio prestado, incrementando los costos de operación y mantenimiento principalmente. El desgaste físico se corrige mediante reparaciones parciales o totales, que a veces no dan buenos resultados, por lo que incrementan el número de horas de paradas para este fin, disminuyendo la eficiencia de operación; como esta situación no se puede mantener en tiempo indefinido, entonces se optará por reemplazar el equipo en un determinado periodo.
- b) **Inadecuado e Insuficiente.** Un equipo se vuelve inadecuado cuando, al cambiar los requerimientos de la demanda o incrementar la mecanización y lograr mayor seguridad, resulta ya demasiado pequeño y con muchas horas de trabajo, siendo incapaz de producir lo planificado en el plan de operaciones. Por lo cual existe la necesidad de sustituirlas con unidades de mayor capacidad y adecuado a las condiciones de trabajo a que serán sometidas según los requerimientos que se desea obtener.
- c) **Obsolescencia.** Se traduce como desventaja económica de una máquina con respecto a otra más avanzada tecnológicamente con el fin de brindar mejores condiciones de operatividad a fin de incrementar su rendimiento. Una máquina no es obsoleta en sí misma sino en comparación con otras más modernas y eficientes, disponible en el

mercado y apta para el mismo servicio. En este caso la reposición es necesaria aunque funcione bien, debido a las múltiples ventajas introducidas en los nuevos equipos ofertados.

d) **Alto costo de Operación.** A medida que el equipo tenga más tiempo de servicio, el costo de operación y mantenimiento incrementa con el uso; para lo cual es necesario determinar el volumen económico de operación. Cuando los costos de mantenimiento y operación incrementan aún más después de realizar el mantenimiento de los equipos en su debido tiempo, es necesario reemplazar el equipo.

1.5.2 FACTORES

Diversos factores de orden interno o externo afectan a las decisiones de reemplazo de equipo, dentro de ellas podemos citar:

a) **Capital Disponible.** Cuando una empresa se encuentra en desarrollo, las inversiones de expansión tienen a menudo prioridad sobre las de mantenimiento y reemplazo de equipos, pero en esta etapa es la que se debe aprovecharse para reemplazar los equipos necesarios; el contrario sucede cuando la empresa alcanza estabilidad y madurez. En cada etapa de su existencia, la empresa debe buscar el equilibrio óptimo entre tipos de inversiones.

b) **Factor de Inercia.** Es la demora injustificada del reemplazo de un equipo, ya que en las empresas existe propensión a dejarse vencer por la inercia, posponiendo las decisiones de cambios necesarios.

c) **Impuesto sobre el Ingreso.** Es el régimen del impuesto sobre la renta, ya que las alternativas que se plantean son: adquirir equipo nuevo o conservar el existente, es decir invertir ahora o diferir la inversión.

d) **Inflación.** En todos los problemas de reemplazo de equipo es muy importante considerar la tasa probable de inflación. La inflación afectará en forma diferente a los

costos de inversión, a los de operación y a los ingresos. El aumento o disminución real de los costos o ingresos respecto a tiempo, sólo puede conocerse corrigiendo las estadísticas respectivas por medio de índices de costos, de manera que todas las cifras queden expresadas en unidades monetarias constantes.

1.5.3 CRITERIOS GENERALES

Existen diversas razones de las mas variadas, por los que un equipo debe ser reemplazado, siempre con la premisa lógica de que el reemplazamiento represente un beneficio económico para la empresa. Entre estas podríamos mencionar:

- a) **Ingeniería.** Se debe a los cambios en diseño de los métodos y las técnicas de producción, ampliaciones, acceso a los tajeos, etc. pueden propiciar el reemplazamiento de equipos en el año de vida en que se encuentren, si además el valor de reventa justifique la operación.
- b) **Finanzas.** Modificaciones importantes del estado financiero de una empresa debido a factores internos o externos también pueden motivar el reemplazo de equipos así como, la adquisición de nuevos o venta de existentes sin reemplazamiento. Entre los factores internos están la disminución o incremento de reservas, aumento o reducción en la producción, etc. y entre los externos están los cambios de las tasas de venta del producto mineral, incremento o reducción de volúmenes de venta, etc.
- c) **Estandarización.** La adquisición de nuevas unidades de una marca seleccionada pueden determinar el reemplazamiento de un equipo con fines de estandarizar sobre la base de una optimización de la logística en los repuestos, programas de mantenimiento y/o servicios. Aquí obviamente interviene el precio potencial de reventa que puede inclinar la balanza hacia la conservación del equipo existen hasta el fin de su vida útil.
- d) **Costo de Energía y Ventilación.** Es un factor que puede incidir en el reemplazamiento de un equipo por otro similar accionado por una fuente de energía

distinta que resulte más ventajosa económicamente y ambientalmente para la empresa Minera.

- e) **Economía.** Es quizá el criterio más complejo y difícil de calcular y aplicar ya que intervienen muchos factores en su determinación como costo de inversión, vida útil, vida económica, costo de operación y mantenimiento, factor de depreciación, valor de reposición, costo de oportunidad, costo de capital, valor de salvataje, producción a la fecha y factores económicos externos.

1.5.4 FACTORES DE ANÁLISIS ECONÓMICO

Los factores que intervienen en el análisis económico para el reemplazamiento de un equipo son varios, entre ellas se conjugan a fin de determinar la conveniencia o no de la operación; dentro de las principales podemos indicar:

- I. **Costo de Inversión o Capital de Inversión.** Es el precio total de un equipo a todo costo, es decir la inversión total a efectuar hasta que el equipo empiece a operar en su lugar de trabajo. Es determinante en la decisión tanto de adquisición como de reemplazamiento.
- II. **Costo de Operación y Mantenimiento.** En el costo de operación está incluido el consumo de energía, combustible, lubricantes, filtros y grasas, operadores y ayudantes. En el mantenimiento están los repuestos, gastos de reparación, mano de obra de los mecánicos y eléctricos, etc. Se juntan ambos en uno debido a que sus incidencias, por unidad de producción, son en ambos casos mayores a mayor vida del equipo.
- III. **Factor de Depreciación.** Cifra porcentual que determina en función de la vida de la máquina, el valor actual disponible de la unidad como activo. Es importante y está reglamentado desde que se considera al amortizar impuestos sobre activos.
- IV. **Costo de Capital.** Valor agregado al costo de inversión para su consecución a través de créditos o financiamiento.

- V. **Costo de Oportunidad.** Rentabilidad mínima adquirible por realizar la inversión alternativa, es decir el costo de inversión más el costo del capital en el período de vida del equipo.
- VI. **Valor de Salvataje.** Precio de obtención probable por venta al final de la vida útil del equipo. En realidad se puede tener un precio de reventa estimado para cada año de vida del equipo.
- VII. **Producción a la fecha.** Unidades de producción realizadas con el equipo cuyo reemplazo está en estudio, a la fecha del diagnóstico. Esto está en función de las características, eficiencia y rendimiento del equipo y sirve de apoyo para obtener el costo promedio de producción por unidad operativa.
- VIII. **Vida Util.** Período de vida de un equipo en que se le puede considerar como unidad utilizable, es decir sin ser dado de baja por inoperancia.
- IX. **Vida económica.** Existirá un período en la vida de un equipo en que su costo total (costo de inversión + costo del capital + costo de operación + costo de mantenimiento) por unidad de trabajo sea el mínimo. Esto debido a que el costo de inversión por unidad, en los primeros años es alto, mientras que el de operación y mantenimiento es bajo y que en los últimos años de vida útil de la máquina, la situación es inversa. Al año de suceso de este período, se le conoce como vida económica que obviamente, como se ve depende de la producción a la fecha del equipo en estudio y de la proyección que se haga sobre su producción futura.

Un activo puede tener varias vidas económicas, cada una relativa a un servicio diferente, con exigencias cada vez menores, lo que se conoce como proceso de **degradación funcional**.

- X. **Vida de Propiedad.** Es el tiempo durante el cual un activo permanece en propiedad de una sola persona o empresa. La vida de propiedad puede abarcar diferentes vidas económicas; sin embargo, cuando el activo sólo puede tener un nivel de servicio para el propietario, es decir, no hay degradación funcional posible, la vida de

propiedad y la vida económica deberían ser idénticas. Aún en este supuesto, el activo puede pasar a otro propietario que pueda utilizar, y tener así dos o más vidas de propiedad

XI. Vida Contable. Período durante el cual se distribuye contablemente el costo de adquisición de un bien capitalizable, dando por resultado el costo de depreciación, o carga por depreciación.

XII. Otros factores económicos. Dentro de otros factores que influyen en el reemplazamiento del equipo tenemos: Impuestos, intereses, inflación y cualquier otro factor económico externo que afecte sobre uno de los factores mencionados anteriormente.

1.6 MODELOS DE INVESTIGACION

1.6.1 MODELO

El modelo se define como una representación simplificada de la realidad; un modelo no puede incluir todo los aspectos de un sistema real, sino solamente lo más importante. El proceso de decidir cuales de ellos serán incluidos en el modelo, es una parte de arte y ciencia de modelación.

1.6.2 CLASES DE MODELOS

Los modelos pueden agruparse por sus dimensiones, función, propósitos, temas o grados de abstracción, etc. La clasificación más común, es aquella que incluye los tipos básicos del cuadro 1.1.

Cuadro No. 1.1

Tipos de modelos y su aplicación

MODELOS	APLICACIÓN
Icónicos o físicos	Simulación de sistemas reales y tratan de interpretar su comportamiento
Análogos	Representan situaciones dinámicos y muestran las características del acontecimiento en que se estudia (curvas)
Matemáticos o simbólicos	Inician con los modelos abstractos y luego se registran como modelos simbólicos, representados por ecuaciones.

Clasificación de modelos matemáticos. - Los modelos matemáticos se clasifican en:

Modelos matemáticos

- Modelos cuantitativos y cualitativos**
- Modelos probabilísticos y determinísticos**
- Modelos descriptivos y de optimización**
- Modelos estáticos y dinámicos**
- Modelos de simulación**
- Modelos heurísticos**

Para el trabajo de investigación que se presenta se emplean modelos probabilísticos y determinísticos.

CAPITULO II

MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA EN MINERIA

2.1 MANTENIMIENTO

El mantenimiento en la Minería es un punto muy importante, tiene por misión conservar en constante y perfecto funcionamiento los equipos de la producción, es también considerado como un sistema que permite obtener la máxima disposición de trabajo de un equipo por medio de inspecciones, reparaciones y modificaciones al más bajo costo de producción, manteniendo el ritmo programado, enmarcado dentro de la política de la empresa. El costo de mantenimiento está directamente relacionado con el costo de producción y generalmente es expresado en \$/t, \$/m³, \$/hr., por ello depende de la cantidad y calidad de las actividades realizadas en el mantenimiento; entonces deberá determinarse el volumen económico de trabajo, para cubrir las necesidades de mantenimiento de los equipos en su debido tiempo y así reducir el costo de mano de obra y materiales a niveles límites con calidad y seguridad.

El mantenimiento genera costo y paralización en los equipos, sin embargo es necesario para el funcionamiento de los equipos, y si no se realiza a tiempo se produce la degradación de los mismos, con consiguientes pérdidas económicas.

La teoría general del mantenimiento se desarrolla en el entorno teórico del fallo o desperfecto, que es el hilo conductor del mantenimiento en su naturaleza, para su prevención, predicción y corrección. Al menos existe siempre una deficiencia inicial cuando se realiza una inspección técnica en las funciones de sus elementos del sistema desde su diseño, proyecto, construcción, montaje, y su posterior utilización en las operaciones de producción; fases que tienen la probabilidad de ser afectadas por el fallo. Entonces en el mantenimiento se debe determinar el origen del desperfecto para dar una solución y luego prevenirlos.

2.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO

Las distintas intervenciones de servicio que se desarrolla en el mantenimiento son confusas por la ambigüedad de los términos que se usan. Pero se pueden resumir en tres tipos que engloban en forma general como se aprecia en la figura 2.1.

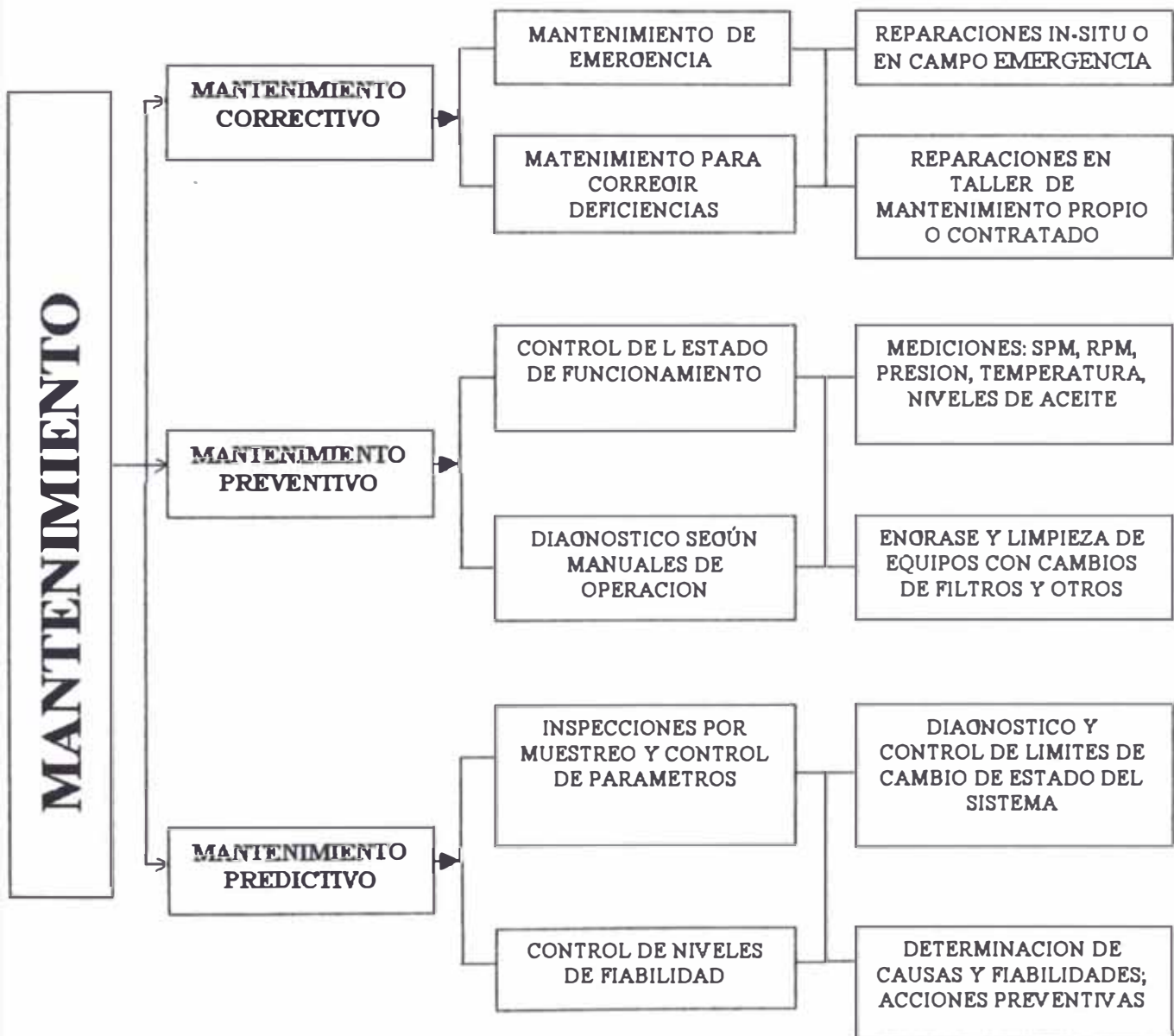


Figura 2.1 Distribución esquemática de tipos de mantenimiento

2.2.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Agrupada toda las intervenciones encaminadas a corregir deficiencias en la maquinaria, una vez que se ha parado o ha dejado de producir, debido a las averías y anomalías presentadas. Estas pueden ser programadas o no en función de la gravedad de las mismas y de las necesidades de operación, a menudo dan lugar a graves paralizaciones de producción, saturación de los medios de mantenimiento e incluso ocasionan accidentes.

En la pequeña y mediana minería el modelo más aceptado es que se actúa sólo con emergencia una vez cuando la avería se ha manifestado por colapso (rotura, interrupción de producción, etc.) cuando no es posible continuar la operación. La ocurrencia de falla obedece a alguna de las distribuciones (Normal, Exponencial, de Weibull u otras) que no se conocen de antemano.

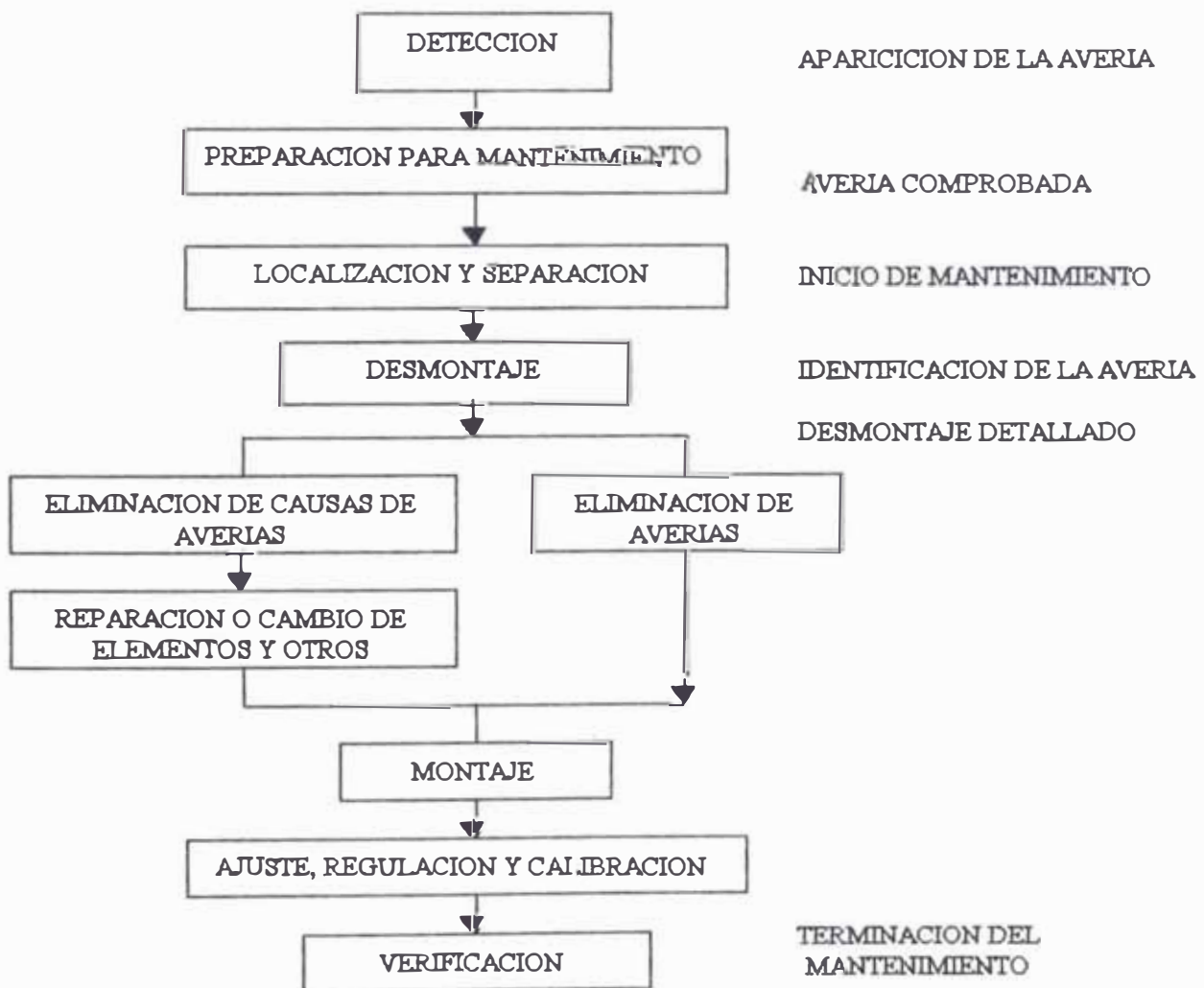


Fig. 2.2 Modelo de mantenimiento correctivo

Según el trabajo que se realice, podemos destacar dos formas de modelos en mantenimiento correctivo:

A. MANTENIMIENTO CORRECTIVO CON ELIMINACION DE AVERÍAS

Se trata de actividades de reparación de emergencias, efectuando recambio de elementos averiados. Usualmente se efectúa bajo fuertes demandas de operación, procurando evitar caídas de producción.

B. MANTENIMIENTO CORRECTIVO CON ELIMINACION DE CAUSAS

Este nivel proporciona soluciones más duraderas, con respectivos aumentos de disponibilidad y fiabilidad a largo plazo. En este caso se requiere de mayor participación de técnicos, así como de mayores tiempos de intervención. Debido a ello, este tipo de mantenimiento se efectúa preferentemente durante los paros administrativos o paradas programadas.

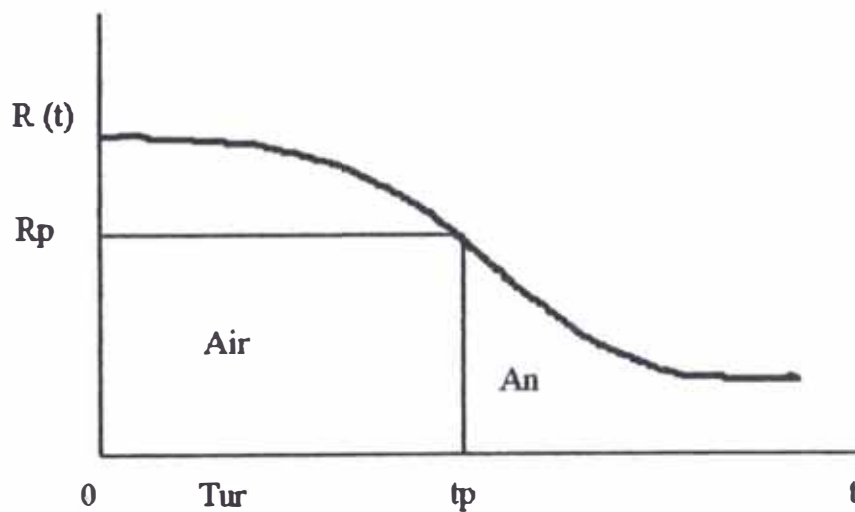


Figura. 2.3 Interpretación del mantenimiento correctivo.

Donde:

$R(t)$ = Fiabilidad

T_{ur} = Tiempo medio de operación

A_{ir} = Zona de recurso aprovechado

A_{n} = Zona de recurso no aprovechado (reserva de uso)

Cuando se aplican acciones preventivas, generalmente se pierde dicha reserva de uso, es decir la posibilidad de aprovechar al máximo cierto elemento o sistema, debido a que la intervención corresponde al tiempo medio estadísticamente pronosticado. Con el mantenimiento correctivo, la zona de reserva de uso si se aprovecha, sin excepción, hasta que sucede el colapso del elemento componente o sistema. Como se ve en la figura 2.3.

Como el correctivo se ocupa de corregir todos los defectos que se van presentando en los distintos equipos y que son denunciados por los usuarios u operadores, tiene ciertos inconvenientes

2.2.1.1 Ventajas del mantenimiento correctivo

- A) Aprovechamiento máximo de elementos hasta la rotura, y contando con un sistema de aprovechamiento eficiente se evitaría la pérdida de recursos no utilizados que con el tiempo de almacenamiento puede dañarse o quedar obsoletos.
- B) No se requiere de alta capacidad de técnicos e ingenieros, ya que las labores de reparación y recambio las ejecutan los mismos trabajadores de mantenimiento (es importante la destreza, más que la capacidad de análisis).
- C) Poca infraestructura administrativa y de diagnóstico.

2.2.1.2 Desventajas del mantenimiento correctivo

- A) Los defectos son denunciados por el personal incompetente para intuir la importancia del fallo y generalmente con gran interés en que no se para la instalación o el equipo, porque mientras dura la reparación puede estar en paro con merma en sus ingresos. De esto se deduce que únicamente se denuncia el fallo cuando el equipo no funciona, lo que en ocasiones motiva que el equipo haya sufrido un deterioro importante, en gran parte evitable con una intervención oportuna del personal de mantenimiento.
- B) Precisamente se ve que no funciona el equipo cuando se deseaba que estuviera en marcha, lo que determina un descenso del rendimiento en producción.

- C) Al no estar previsto dicha falla por el personal de mantenimiento ocurrirá lo siguiente:**
Si el personal no es suficiente, cada hombre tendrá su trabajo asignado y el equipo ha de esperar parado hasta que llegue el momento de su reparación; y si puede ir una o más personas a efectuar la reparación, cuando la plantilla sea excesiva.

Encontrar el punto óptimo entre estos dos extremos, es mucho más difícil de lo que a primera vista pudiera parecer por la dispersión que sufre, a través del tiempo la frecuencia con que se presentan las averías. La solución que en la práctica se utiliza es dedicar gran parte del trabajo del jefe de mantenimiento, o al menos del jefe responsable, en quitar personal de una reparación y ponerlo en otra que parece más urgente, lo que lleva consigo grandes pérdidas de tiempo y desorientación del personal de mantenimiento y reparaciones.

- D) Una vez presentada la avería siempre hay un mayor gasto de repuestos y horas de trabajo, que junto con la pérdida de producción correspondiente se traduce en un mayor costo, que se podría haber evitado tomando mayor atención al equipo.**
- E) Baja seguridad de operación y ambiente de trabajo deficiente (ruidos, vibraciones, y otros).**
- F) Colapsos impredecibles, que pueden llegar a provocar daños y averías en cadena de proporciones desconocidas. Por lo que, a menudo se tiene que ir a una considerable plantilla del personal en mantenimiento, al no disponer de datos sobre las posibles intervenciones. Y como resultado se obtiene una relativa baja calidad de mantenimiento, debido al poco tiempo disponible para reparación.**
- G) Riesgo de falla de elementos de difícil adquisición (altos costos, largos tiempos de espera, y otros). Lo que obliga a tener un stock grande de repuestos en almacén.**
- H) No es recomendable en casos de equipo crítico con alta efectividad operacional requerida.**

2.2.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Surge como una necesidad natural de remediar los defectos del mantenimiento correctivo. Las actividades del mantenimiento preventivo están orientadas hacia la renovación de fiabilidades de sistemas técnicos, y comprende todas las intervenciones programadas por mantenimiento durante la vida del equipo, adelantándose a la avería e imprevistos mediante una adecuada planificación, corrigiendo los puntos más vulnerables en el momento oportuno, alargando la vida del equipo, pudiendo al mismo tiempo aportar datos para proceder a una constante y bien estudiada modernización. Pero en contrapartida tiene un costo elevado al reducir los plazos de sustitución de las piezas.

Debido a que toda avería tiene carácter estocástico, es importante que el mantenimiento preventivo realice recambios de elementos o sistemas justo antes del momento de la avería. Esta incertidumbre se compensa con la reposición anticipada a la avería, causando la ausencia de aprovechamiento de la reserva de uso del elemento o sistema sustituido

La tecnología preventiva comprende, entre otras, las siguientes actividades:

1. Revisiones periódicas (visuales, sin diagnóstico).
2. Limpieza y protección anticorrosiva (conservación).
3. Lubricación y engrase.
4. Búsqueda y reconocimiento de puntos débiles de sistemas técnicos.
5. Reparación y recambios planificados.

También se considera dentro del mantenimiento preventivo a otras actividades como el reacondicionamiento y la modificación de diseños, adaptándolos a las necesidades de la maquinaria y estas son:

- **Ingeniería Preventiva.** Que consiste en trabajar sobre aquellos puntos que originan anomalías con objeto de diseñarlos nuevamente de forma que se reduzcan estas.
- **Reacondicionamiento Sistemático.** Se ocupa de remozar aquellas máquinas o componentes que por su utilización u horas de trabajo están en condiciones tales que hacen difícil el poder conseguir el funcionamiento correcto de los mismos.

Un mantenimiento preventivo con planificación de actividades requiere de amplios conocimientos de la teoría de fiabilidad, ya que, sin criterios estadísticos correctamente aplicados para determinar los tiempos óptimos de intervención, pueden generar grandes pérdidas.

2.2.2.1 Mantenimiento preventivo programado

Las primeras recomendaciones que dan los fabricantes de equipos, sobre los tiempos óptimos necesarios para realizar el mantenimiento preventivo, se basan en los muestreos de sus productos. En los manuales de operación y mantenimiento se señalan los tipos de recambio, ajustes e intervenciones y otras actividades preventivas, conjuntamente con la programación en términos de cantidad de horas de operación, para garantizar el funcionamiento óptimo del equipo o sistema en cuestión. Considerando el mantenimiento desde el punto de vista de los fabricantes, que un equipo nuevo tiene la mínima intensidad de averías $Y(t)$, luego por desgaste y envejecimiento en general, aumenta hasta que la probabilidad de avería acumulada $F(t)$ llegara hasta cierto límite permitido (por ejemplo el 2%).

Estadísticamente se determina el momento oportuno de suspensión de la operación, aplicando el mantenimiento preventivo durante un período de tiempo (t_p) y luego la puesta en marcha, asignándole al sistema renovado una intensidad de avería aproximadamente igual que a un sistema nuevo, luego reincidiendo el ciclo de vida del sistema, incurriendo con ello en submantenimiento o sobremantenimiento del equipo, En la siguiente figura se aprecia este concepto.

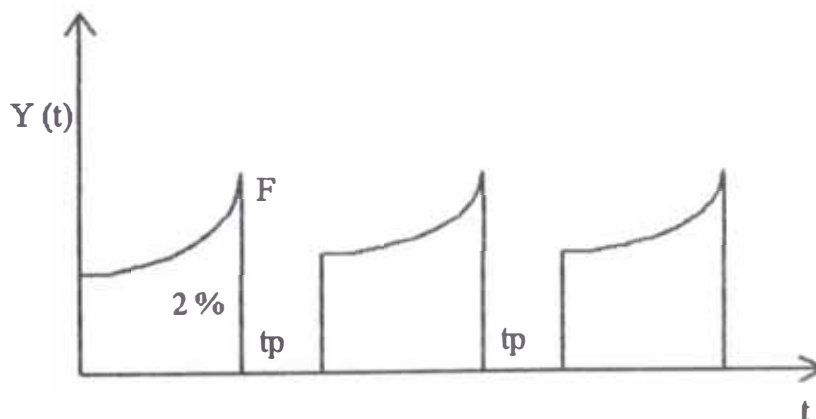


Figura 2.4 Concepto tradicional del mantenimiento desde el punto de vista de los fabricantes.

2.2.2.2 Distribución de la intensidad de avería de un equipo

La mayoría de los sistemas físicos de un equipo, en general obedecen a la siguiente distribución cualitativa de intensidad de averías a lo largo de su vida, conocida como la Curva de Davies o Curva de la Bañera, con tres fases bien marcadas, como se puede ver en la figura 2.5.

FASE I

“**Nacimiento**” del sistema, que implica alta intensidad de averías, por falta de adaptación e inmunidad hacia el medio ambiente y del lugar de trabajo, también por fallas del control de calidad y de ajuste técnico o asentamiento de algunos elementos.

En sistemas mecánicos, cuyo mantenimiento puede considerarse el más crítico por diversos procesos; esta fase prácticamente no existe y es fácil de eliminar el pre-envejeciendo por una muestra en fábrica de un sistema, usualmente aumenta algún parámetro de carga. Mientras que en los sistemas mecánicos dinámicamente cargados, generalmente están sometidos al fenómeno de fatiga, que se propaga en forma oculta y relativamente lenta, hasta el colapso por sobrecarga.

Debido a ello, una de las posibles variantes en la descripción estadística de esta fase, también llamada “fallas de Juventud” puede ser la distribución de Weibull, con un valor de $\beta < 1$.

La intensidad de averías aminora rápidamente en esta fase, llegando a su mínimo una vez terminada la mortandad o fallas de juventud del equipo nuevo.

FASE II

También denominada “**Vida Útil**” de un sistema físico, es de mayor duración relativa y se caracteriza por la intensidad de averías prácticamente constante. Se trata de la distribución exponencial de averías, con $Y = Cte$. Donde las fallas ocurren accidentalmente.

Por lo que cualquier intervención preventiva en este periodo, que interfiere con la operación del sistema, no es necesaria, ya que es más viable aplicar el mantenimiento correctivo. Esta fase es de mayor aprovechamiento y las intervenciones sólo pueden implicar sobre o submantenimiento. En la figura 2.6 se observa que la actividad preventiva programada puede causar los siguientes efectos:

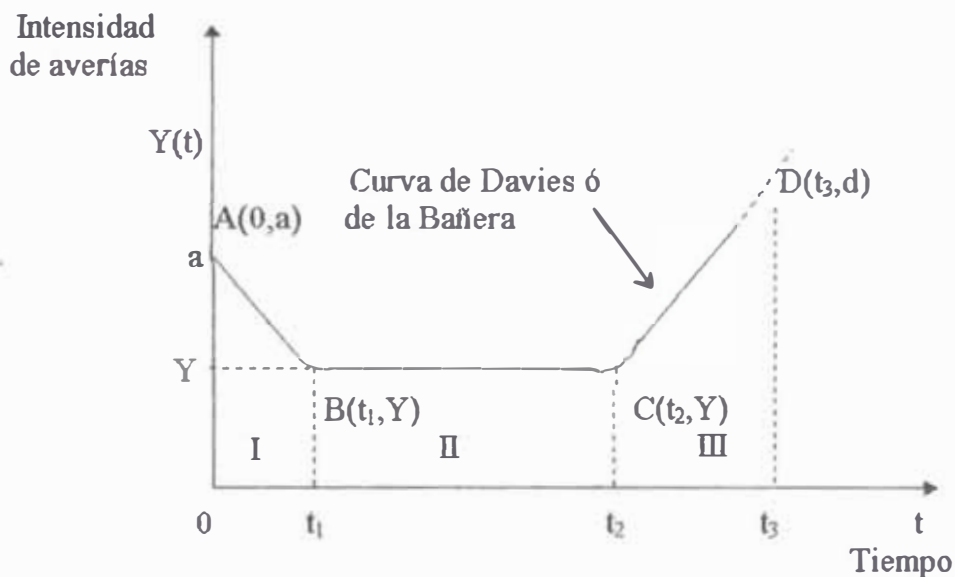


Figura. 2.5 Distribución general de intensidad de averías.

- Interrupción innecesaria de la Fase II, por un período de tiempo (t_p) para desarrollar la acción programada del mantenimiento preventivo, disminuyendo así la disponibilidad del sistema por el exceso de paros y caer en sobremantenimiento.
- **Aumento** de "Fallas de Juventud", ya que toda actividad preventiva potencialmente **incrementa** la intensidad de averías (baja fiabilidad del elemento humano), y reduce el tiempo de trabajo real del equipo.
- **Aumento** global de los costos de mantenimiento

FASE III

Representa “La Vejez” del sistema por desgaste, siendo el aumento de $Y(t)$ gradual y monótono, obedeciendo la forma de una distribución Normal.

En esta fase la actividad de mantenimiento es la más relevante, ya que en ella se manifiestan con mayor énfasis distintos tipos de mantenimiento como el predictivo que determinaría el momento oportuno de intervención en esta etapa final del ciclo de vida del equipo.

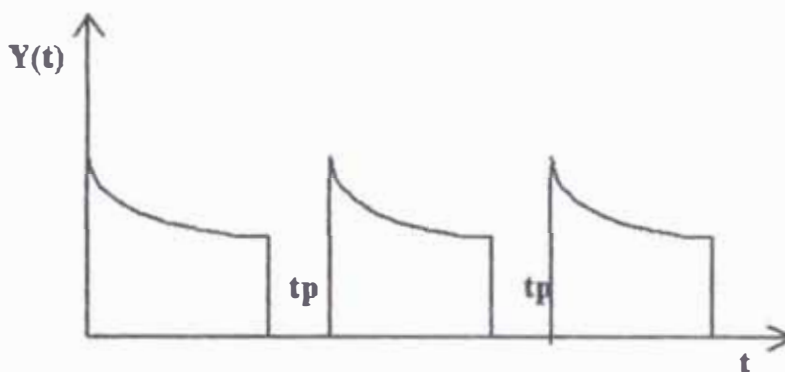


Figura 2.6 Incremento de $Y(t)$ por sobremantenimiento.

La curva de intensidad de averías durante la vida de una máquina, llamada también “Curva de la Bañera”, debido a su forma, ya antes presentada. Puede describirse estadísticamente mediante la llamada función lineal seccionada de intensidad de averías, en sustitución de las distribuciones mencionadas. De esta manera las funciones de intensidad de averías por segmentos, son las siguientes:

$$\text{Fase I} : Y(t) = a - At \quad \text{para } 0 < t < t_1$$

$$\text{Fase II} : Y(t) = Y - \text{Cte.} \quad \text{para } t_1 < t < t_2$$

$$\text{Fase III} : Y(t) = Y - C(t - t_2) \quad \text{para } t_2 < t < \infty$$

Las funciones de fiabilidad correspondientes son:

$$R(t) = e^{-(at - At^2/2)} \quad \text{para } 0 < t < t_1$$

$$R(t) = e^{-(at - At^2/2 + Y(t - t_1))} \quad \text{para } 0 < t < t_2$$

$$R(t) = e^{-(at - At^2/2 + Y(t - t_1) + (C/2)(t - t_2)^2)} \quad \text{para } 0 < t < \infty$$

2.2.2.3 Volumen óptimo de mantenimiento preventivo

Para evaluar la calidad de servicio apropiado que necesita suministrarse a los equipos e instalaciones de una empresa, se relaciona el mantenimiento fundamentalmente con el costo-beneficio que se obtiene mediante la aplicación de informes de producción en función al tiempo, considerando las pérdidas por el tiempo de parada de los equipos, los gastos de consumo de repuestos y materiales por el deterioro excesivo del equipo, y otras causas que afectan a la producción y sean atribuibles a fallas de mantenimiento. Con lo anterior se cuantifican pérdidas y se trazan gráficos en unidades de costos frente a unidades de tiempo, hasta determinar un costo mínimo para un volumen adecuado de mantenimiento correctivo y de mantenimiento preventivo.

El costo de operación será menor cuando el costo total combinado con el mantenimiento sea mínimo y esto se logra cuando la suma del costo de mantenimiento correctivo y del mantenimiento preventivo es mínima, como en la figura 2.7

En la práctica, es difícil de obtener la suficiente información para determinar el costo mínimo de mantenimiento, por lo que es necesario implementar un detallado historial de cada equipo. Un buen departamento de mantenimiento debe buscar con su trabajo, conseguir que los elementos y sistemas que se vayan a mantener estén dentro del costo mínimo de operación, esto se logrará vigilando atentamente, que los costos de mantenimiento programado, incluido el predictivo sean iguales a los costos de máquina parada por averías, incluyendo repuestos y materiales, reflejando así la buena calidad de servicio que normalmente toda empresa debe esperar de sus recursos físicos que lo componen.

Si por razones de seguridad del personal, imagen de la empresa, obsolescencia de máquinas o mal estado de éstas, es necesario aumentar los costos de mantenimiento, para conseguir un menor tiempo de paro, este nuevo valor de costo combinado nos dará un nuevo índice de calidad del servicio a los equipos, que estará en función del número de intervenciones y correcciones realizadas por mantenimiento.

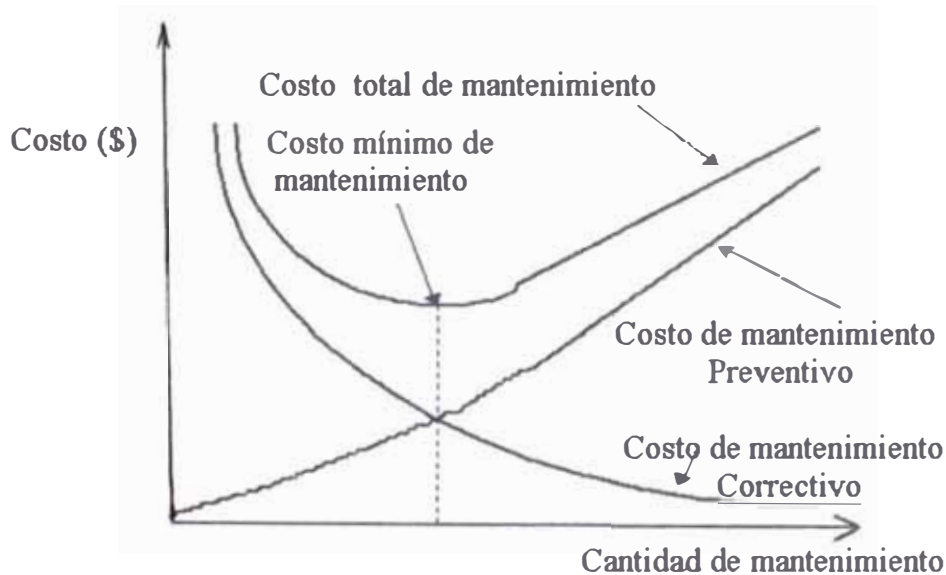


Fig. 2.7 Determinación del costo mínimo de mantenimiento

2.2.2.4 Ventajas del mantenimiento Preventivo.

- A) Evitar **grandes** reparaciones, muy costosas en general, por averías que normalmente son debidas a causas pequeñas no tomadas en cuenta.
- B) Disminuye la frecuencia de paradas por mantenimiento al aumentar la disponibilidad, da seguridad en el funcionamiento y minimiza los costos de reparaciones.
- C) Permite preparar con tiempo las reparaciones, acopiando repuestos y herramientas, prever las necesidades de personal y planificar su ejecución en coordinación con operaciones.
- D) Aumentar la vida **esperada** de los equipos o por lo menos, permite que cubran su **amortización** total, identificando y controlando los componentes de mayor costo.
- E) Mantener las **máquinas** en perfectas condiciones y si es posible mejorar su calidad, para asegurar la protección de las instalaciones y del equipo, así como la seguridad del personal.

2.2.2.5 Desventajas del mantenimiento preventivo.

- A) Por **sobremantenimiento**, cuando se interrumpe la vida útil y operación normal de un sistema del equipo sin tener conocimiento de causa, la reserva de uso de vida será **totalmente desaprovechada**, aparte de la **acumulación innecesaria** de actividades preventivas que **aumentan el gasto** y **abaten la disponibilidad**.

- B) Por **submantenimiento**, cuando se determinan inadecuadamente los tiempos entre averías y la programación preventiva se retrasa con respecto a la avería, el mantenimiento correctivo toma el lugar del preventivo, neutralizando sus posibles beneficios.

- C) El mantenimiento preventivo requiere de modelos de optimización en cuanto a su **programación**, porque ni las recomendaciones de los fabricantes pueden resolver problemas de tiempos de intervención, por no disponer aquellos de conocimiento sobre las condiciones de operaciones particulares de **cada** equipo.

- D) Se aplica a un número promedio de elementos de la misma clase y depende del tamaño de la muestra (nivel de confianza estadística), para determinar que tan cercanos a la realidad serán los datos obtenidos. A un jefe de mantenimiento le interesa el **comportamiento** de sus máquinas y no promedios probabilísticos del fabricante.

- E) Para elaborar distribuciones empíricas, aún conociendo la teoría de fiabilidad, se requiere de tiempo y registro de datos, de por lo menos 2 a 3 años de operación.

Entre los objetivos del mantenimiento preventivo podemos citar: calidad, rapidez y costo. En **mantenimiento** hay que lograr rapidez y un costo razonable. Normalmente son trabajos cortos los que se efectúan y por tanto, son susceptibles de un buen presupuesto. Para ello, es necesario trabajar con métodos: una buena organización para establecer un sistema con procedimientos sencillos de coordinación y mantener un control riguroso. Es imprescindible un **mínimo** de medios materiales, un buen almacén y estrecha relación con los proveedores y fabricantes.

El mantenimiento debe reportar una economía ya que en caso contrario no es interesante. Por ello, es necesario una buena distribución del trabajo, evitando los tiempos muertos en la ejecución de un trabajo con un estudio previo y un presupuesto lo más detallado posible ~~analizando~~ todos sus conceptos, ya que luego durante su proceso resultan caros, en tiempo y material así como las modificaciones que se introduzcan.

2.2.2.6 Relación entre los recursos y el rendimiento

Es conveniente considerar la relación entre el nivel de los recursos de mantenimiento y el rendimiento en función del estado de la instalación y la seguridad. En general, cuanto más alto sea el nivel de los recursos tanto mayor será el rendimiento y tanto mayor será el estado y la seguridad de la planta o instalación. Así pues, desde el punto de vista de la rentabilidad de la empresa, el objetivo del mantenimiento sería equilibrar el nivel de recursos, con los beneficios, según el rendimiento, la seguridad de la maquinaria y sus instalaciones.

La relación más sencilla entre los recursos y el rendimiento sería el nivel normal de recursos exigidos para asegurarse que la maquinaria alcance su nivel de rendimiento esperado, en función de la disponibilidad del equipo y de la demanda de la producción. Por lo general, el departamento de producción exigirá un rendimiento a cada tipo de maquinaria y el departamento de mantenimiento deberá lograr con el mínimo costo de los recursos.

El departamento de mantenimiento no sólo habrá de decidir sobre los niveles de recursos necesarios, sino que también estos recursos deberán ser utilizados del modo más eficaz, para reducir al mínimo los costos de los recursos, como se observa en la figura 2.8

Lo que hay que resaltar es que, mientras que la demanda de niveles de rendimiento por parte de producción pueden variar de un modo considerable, es extremadamente difícil que los niveles de recursos de mantenimiento puedan seguir tales fluctuaciones, a menos que la mayor parte de estos recursos sean contratado a terceros.

Así pues, una forma de expresar el objetivo del mantenimiento es: posibilitar la producción con un rendimiento a corto y largo plazo con el mínimo de costo de los recursos y

ajustándose a niveles satisfactorios del estado y de la seguridad de la maquinaria a mantener.

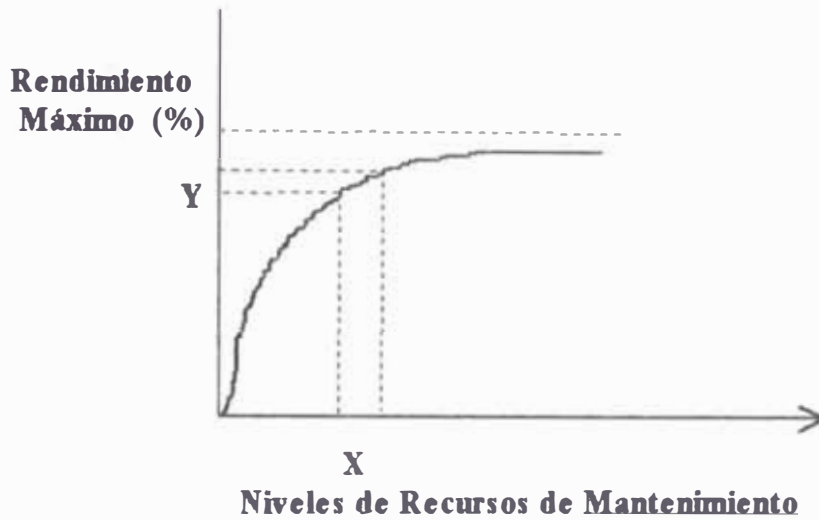


Figura 2.8 Relación entre recursos y rendimiento en mantenimiento

$$\text{ECONOMIA NETA DEBIDO AL PLAN DE MANTENIMIENTO. } F(c) = \text{BENEFICIO POR EL AUMENTO DE RENDIMIENTO. } (Y) - \text{AUMENTO DE COSTO POR MANTENIMIENTO. } (X)$$

Se puede controlar el nivel de costos de recursos en mantenimiento, utilizando acertados programas de diagnóstico de posibles fallas en los componentes y sistemas de la maquinaria que normalmente se presenta con gran frecuencia de avería. Ya que estas se manifiestan en función de la ley de Pareto, es decir que aproximadamente un 20 por 100 de los componentes de los equipos causan el 80 o 100 de efectos de las averías. Ver figura 2.9

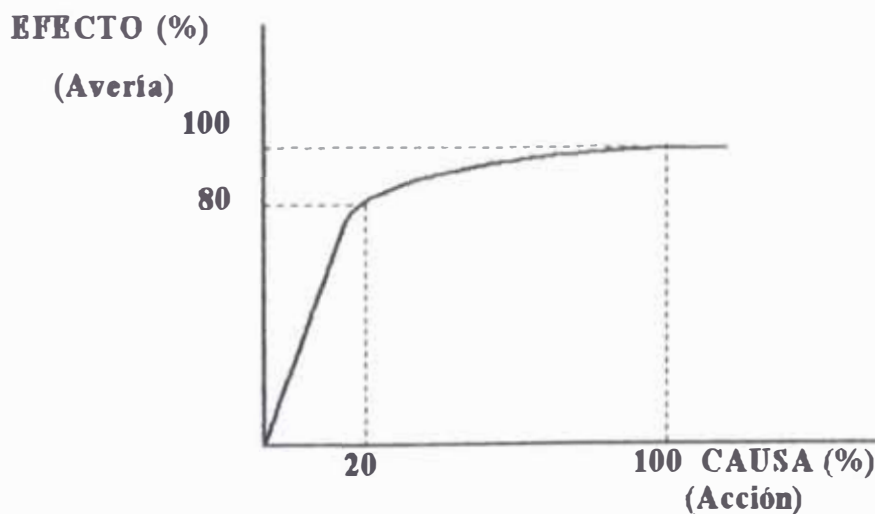


Figura 2.9 Relación entre efectos y causas de averías

2.2.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

Es un refinamiento del mantenimiento preventivo, consistente en detectar la avería cuando está a punto de producirse. Evita los elevados costos de reparación, pero no permite tan buena planificación como en el mantenimiento preventivo puro. Comprende todos los métodos encaminados a conocer el estado de la maquinaria mediante el uso de procedimientos y técnicas de inspección no destructivas, y otras, que miden el desgaste progresivo a lo largo del tiempo y predicen los puntos de posibles fallas, de forma más acertada que una estimación estadística del momento de sustitución, como lo hace el preventivo. Tales procedimientos pueden ser el control de la contaminación de aceites, análisis de vibraciones, la monitorización, nivel de ruido, líquidos penetrantes, ultrasonido para la detección de fisuras, microscopio, etc.

Tiene por objeto optimizar el mantenimiento planificado desarrollando las actividades en el momento oportuno, detectando el estado real de los componentes más críticos y permite tomar medidas correctivas antes de que se produzca la avería, reduciendo los costos de mantenimiento.

El mantenimiento predictivo se implanta para aprovechar la vida útil completa, con gran parte de reserva de uso, sin incurrir en emergencias correctivas, ni tampoco aplicar actividades preventivas innecesarias. Para ubicar la efectividad del predictivo, tenemos que analizar diversos límites de cambio de estado técnico del sistema (equipo, conjunto, componente y elementos), que tiene como función primaria la transformación útil de materia, de energía, de información, o alguna de sus combinaciones.

Entendiendo por ESTADO TECNICO a la condición de equilibrio dinámico entre influencias externas e internas del sistema, caracterizadas por la estabilidad y permanencia dentro de los límites de desviación permisible de sus variables (magnitudes físicas), según las condiciones proyectadas de operación.

2.2.3.1. Volumen de variables a controlar en mantenimiento predictivo.

Para poder analizar un sistema técnico es preciso delimitar en el tiempo y espacio, aislándolo imaginariamente del resto de subsistemas, de tal forma que nos permita

sistematizar todos los flujos de materia, de energía y, de información hacia o del sistema, puede representarse:

$$P = f(K, R, t)$$

Donde el conjunto de variables de salida (P), esta en función de estado técnico del sistema, que a la vez depende de los vectores de entrada (K), perturbaciones del sistema (R) y tiempo (t).

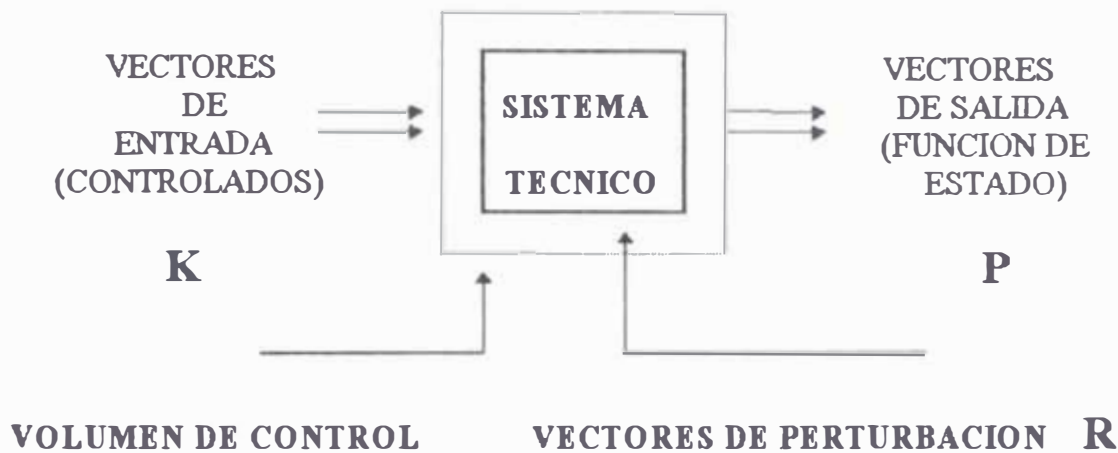


Figura 2.10 Volumen de control de un sistema.

2.2.3.2 Selección de sistema por orden de prioridad.

Conviene partir por una definición general de los sistemas existentes, clasificándolos según sus características y luego seleccionándolos por orden de importancia, siguiendo algunas pautas.

1. Realizar una lista completa de los sistemas que participan en el proceso productivo, mediante criterios definidos.
2. Recabar información concerniente a los procesos y estructura de los sistemas, a partir de:
 - Manuales de operación y mantenimiento por parte del fabricante.

- Historial de mantenimiento (listados en ordenador o registros manuales), de equipos en operación
- Documentación técnica, memorias de cálculo, certificado de materiales, características detallados del equipo y todos sus elementos (potencia, RPM, tipos de rodamientos, clasificación de materiales).
- Bibliografía de apoyo (textos de ingeniería básica, manuales, artículos especializados y otros).
- Catálogos y folletos de proveedores de equipos de diagnóstico.

3. Discriminación y selección de los sistemas que participen significativamente en la reducción del gasto.

El criterio de discriminación estará en función a valores de rangos que irán desde poco influyentes o no importantes a muy críticos o de máxima prioridad.

2.2.3.3 Modelos básicos de mantenimiento predictivo.

Los modelos se desarrollan según el tipo de control de las medidas a diagnosticar.

A) MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON CONTROL DE PARAMETROS

La estrategia del control de parámetros tiene carácter de planificación de momentos de control y tipos de media y diagnóstico, siendo el objetivo encontrar límites E1 y E2 (preavería y desgaste máximo). Si el parámetro observado alcanza E1, debe planificarse mantenimiento preventivo con tiempo máximo de predicción $t = t_2 - t_1$. Ver figura 2.11.

Para ver la efectividad del mantenimiento predictivo, tenemos que analizar diversos límites de cambio de estado del sistema. Dichos límites son de carácter cualitativo, presentados con el objeto de distinguir las fases de desgaste, pero cambian según las condiciones tribológicas, económicas, administrativos, y otras.

Cabe señalar que el papel del mantenimiento predictivo tiene su máxima expresión en la tercera fase de vida (vejez), ya que durante la vida útil no hay variación significativa de parámetros de estado técnico y los accidentes no se pueden prevenir. El mantenimiento predictivo por control de parámetros se basa en la función de cambio de estado técnico, en el sistema de diagnóstico y en el sistema de anticipación.

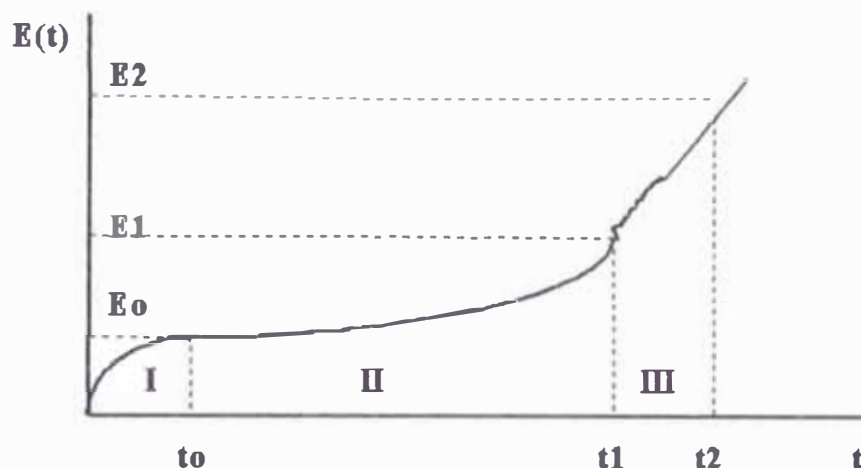


Figura 2.11 Límites de desgaste

Donde:

$E(t)$ = Desgaste en función del tiempo

E_0 = Límite inferior de diagnóstico (ajuste inicial)

E_1 = Límite precrítico (selección y exclusión de averías)

E_2 = Límite de desgaste (nivel máximo)

- I. Zona de seguimiento de adaptación del sistema al medio, incluyendo fallas juveniles.
- II. Zona de desgaste moderado, correspondiente al diagnóstico de estado durante la vida útil.
- III. Zona de cambio intenso de estado técnico.

B) MANTENIMIENTO CON CONTROL DE NIVELES DE FIABILIDAD.

Es en esencia un mantenimiento preventivo dinámicamente programado, donde se considera el nivel global de fiabilidad del sistema observado y cuando éste discrepe de los límites tolerables, se analizan fiabilidades de los elementos constituyentes del sistema, se buscan

causas y aplican acciones preventivas. Este modelo de mantenimiento predictivo depende de las siguientes circunstancias: Un amplio uso de ordenadores, porque es virtualmente imposible analizar manualmente la cantidad de informaciones estadísticas involucrados. Fichas históricas de mantenimiento bastante detalladas con datos de intensidad de averías y otros parámetros. Infraestructura administrativa grande ya que las decisiones de mantenimiento se desarrollan en oficina una vez tomado los datos en campo.

A veces una fiabilidad demasiado baja, como otra excesiva, resulta subóptimas, considerando un rango aceptable del óptimo global para la mayoría de sistemas técnicos mecánicos entre 0,76 a 0,90.

2.2.3.4 El diagnóstico técnico en mantenimiento predictivo

El diagnóstico por medio de aparatos de medidas practicados en los controles periódicos a los equipos, es una parte importante del mantenimiento predictivo. Se puede realizarse a diferentes niveles:

- 1) Observación de colapso del sistema, conjunto, componente y elemento, con el único síntoma (interrupción de operación).
- 2) Indicación del elemento donde ocurrió la avería.
- 3) Observación subjetiva de síntomas de mal funcionamiento, antes de que ocurra el colapso.
- 4) Seguimiento organizado con medición de variables de estado y comparación de sus valores con patrones de referencia preestablecidos.
- 5) Sistemas inteligentes de diagnóstico con intervención automática.

El mantenimiento predictivo, por lo general, se mueve en los niveles 3º y 4º, dependiendo más de la destreza y experiencia individual de los operarios presentes físicamente cerca del sistema observado, que de una labor ingenieril sistematizada, debido a que no existe una cultura de hacer mediciones en las áreas de mantenimiento.

La labor de diagnóstico consta de las siguientes fases:

- A. Conocimiento de la estructura y funcionamiento del sistema.
- B. Selección de variables de estado técnico, puntos de medición, aparatos y técnicas correspondientes.
- C. Toma de datos.
- D. Comparación de patrones de referencia (normas, datos internos, etc.)
- E. Proceso de análisis y conclusiones.
- F. Reporte e información de resultados.

En años recientes en algunas ramas industriales se han introducido en mantenimiento, sistemas de procesamiento electrónico de datos, con el desarrollo simultáneo de diversos paquetes de Software, con distintas posibilidades. Como el reconocimiento y registro manual de datos medidos y alimentados al ordenador, uso de colectores de datos por ordenador y centros de diagnóstico.

2.2.3.5 Selección de técnicas de diagnóstico

Se trata de un procedimiento con implicaciones técnicas, económicas y administrativas en el contexto empresarial, en donde influyen los siguientes factores:

- Nivel de gastos y tipos de mantenimiento en condiciones actuales e implantación de nuevas tecnologías.
- Condiciones generales de la empresa y tiempo en operación.
- Grado de actualización tecnológica y experiencia del personal de mantenimiento, y políticas de formación técnica.
- Costos de tecnología y formación del personal, gastos administrativos diversos.

Más adelante se resumen los métodos de diagnóstico de amplio uso en la industria, que pueden ser aplicados en los programas de mantenimiento de maquinaria minera.

2.2.3.6 Método de diagnóstico

Cuanto menor participación tengan los métodos subjetivos en el diagnóstico (Inspecciones auditivas y visuales), mayor será la calidad de los mismos. Aunque hoy en día existe una amplia oferta de tecnología de medida y análisis, para la totalidad de parámetros a diagnosticar.

A) Inspecciones Visuales.

El instrumento que mejor discrimina colores, brillo intensidad de luz, es el ojo humano, sin embargo éste método tiene sus restricciones provenientes de las condiciones de trabajo, como inaccesibilidad, velocidad de cambio de imágenes, altas temperaturas, campo visual reducido.

Fotografía y vídeo. Para registrar aspectos exteriores de sistemas, componentes, elementos. Comparando el cambio físico en el deterioro de elementos, como engranajes, sellos, fugas, lubricación.



Figura 2.12 Esquema de métodos de diagnóstico técnico

Endoscopia. Inicialmente se utilizaba espejos de diversos tipos para facilitar inspecciones en lugares de difícil acceso y diversos tipos de pequeños instrumentos de tipo periscopio. Con el descubrimiento de fibras ópticas se desarrollaron endoscopios flexibles basados en una fuente de haz de luz (luz estroboscópica), que permiten inspeccionar y determinar el desgaste de engranajes en reductores, cajas de transmisión, etc.

Perfilometría. Como técnica de diagnóstico para apoyar el mantenimiento predictivo, este método ha encontrado su aplicación en observación de desgastes de ciertas partes sujetas a abrasión, erosión y otros mecanismos tribológicos. Mediante la verificación de la geometría estándar (dimensiones, ángulos) de engranajes, elementos, hasta de instrumentos de precisión.

Microscopía. Su aplicación como método de diagnóstico se encuentra en estudios metalográficos, para el análisis de estructuras de metales y sistemas ferrogáficos. Asimismo, los análisis fracturográficos requieren en ocasiones de inspecciones microscópicas para analizar causas de colapsos de elementos de máquinas.

Estroboscopia. El fenómeno estroboscópico se basa en la inercia del nervio óptico humano, con el que llegamos a la imposibilidad de seguir cambios rápidos de imágenes. Una lámpara estroboscópica opera con generador de frecuencias que regula los destellos de una bombilla (de xenón o cesio). Si el haz de luz se dirige hacia un objeto en movimiento repetitivo (rotación, vibración) y se iguala la frecuencia de destellos con la RPM de dicho objeto, se obtiene un efecto de “congelamiento visual”, debido a que el objeto en movimiento se percibe aparentemente parado. Este efecto se presenta a partir de (10 Hz) en promedio, ya que a las velocidades de rotación más bajas no se manifiesta la inercia del nervio óptico. Los estroboscopios se usan para:

- Verificación de aspecto exterior de piezas en movimiento como engranajes, correas y poleas, árboles de levas, válvulas de cierto tipo, permitiendo observar daños superficiales sin tener que paralizar el equipo.
- Como parte integral de un analizador de vibraciones o de sonido, donde la frecuencia y momento de disparo de destellos se regula con el oscilador interno del analizador, en función de máxima amplitud (tensión), correspondiente al fenómeno acústico o vibratorio. La aplicación se encuentra en el análisis de ángulos de fase, técnicas de

equilibrado y como medio complementario en la localización de fuentes de ruido o vibraciones.

Sistemas ópticos avanzados. El descubrimiento del rayo láser ha impulsado desarrollos tecnológicos en diversas actividades industriales, como en las técnicas de alineación, en la medición de vibraciones con sensores de proximidad y particularmente en la holografía que se utiliza para el análisis de vibraciones (tipo modal) y en estudios tribológicos de desgastes de superficies.

B) Medida y análisis de comportamiento dinámico.

B.1. Diagnóstico por vibraciones.

La vibración es el fenómeno dinámico que está mejor correlacionado con las averías mecánicas no sólo como síntoma sino también porque el aumento de vibraciones provoca probabilidad de falla en proporciones matemáticas bien definidas. Las vibraciones como efecto de averías y su severidad predicen fallas sin necesidad de suspender la operación del sistema observado, constituyéndose en un parámetro predictivo por excelencia. Asimismo, tiene buena correlación con fenómenos eléctricos, magnéticos, neumáticos, hidráulicos y aerodinámicos.

La tecnología de aparatos de medida y análisis de vibraciones es la más desarrollada de todas las técnicas de diagnóstico, ofreciendo una amplia gama de productos (unas 60 marcas en el mundo) para todo tipo de necesidades requeridas en la industria. Como los vibrómetros simples que miden niveles globales de amplitud, vibrómetros medidores de amplitud de vibración en banda ancha, analizadores de vibración con barrido manual o automático de frecuencia y analizadores de tiempo real, aparatos de análisis especial. El principio de funcionamiento de estos instrumentos se basan en mediciones de: onda armónica caracterizada por el período y amplitud, la frecuencia del número de ciclos vibratorios, fases y ángulo de fase, entre otras.

Entre algunas causas de vibraciones según su naturaleza podemos citar a. Fuerzas mecánicas (desequilibrio rotacional, desalineación, torcedura de ejes y árboles, daños en cojinetes y

engranajes, problemas de correas y poleas, desajustes, aflojamientos y holguras, etc.); Fuerzas hidráulicas y aerodinámicas (cavitación, golpe de ariete, inestabilidad de película de aceite en cojinetes con lubricación, fuerzas de paso de rotores y bombas); fuerzas eléctricas y magnéticas (deterioro de aislamiento en devanado de motores, problemas de excitación, desequilibrio eléctrico de fases, barra rota de estator); Fuerzas térmicas (dilataciones termomecánicas de diversos tipos de elementos de máquinas).

B.2 Diagnostico y análisis de averías en rodamientos

Los rodamientos representan los llamados “fusibles mecánicos” de la mayor parte de máquinas rotativas, que por su fabricación, independientemente de su tecnología, tienen pequeñas áreas de contacto entre elementos rodantes que desarrollan grandes presiones de Hertz, bajo las cuales el rodamiento está expuesto a la fatiga de superficie lo cual los constituyen en elementos relativamente de baja fiabilidad operacional, como ejes, árboles, husillos y otros, donde se originan vibraciones y son susceptibles a:

- Tolerancias de montaje y forma de ajuste.
- Régimen de operación, concerniente al cambio de RPM y carga que deben soportar.
- Condiciones del medio ambiente (temperatura, viento, polvos, medios químicamente agresivos).

Entre las técnicas y aparatos empleados para hacer el diagnóstico de averías en rodamientos tenemos:

Inspecciones auditivas de rodamientos. Desde un destornillador apoyado en la caja de rodamiento hasta un estetoscopio electrónico con posibilidad de ampliar la señal.

Medida de temperatura. Por contacto o con pirómetro infrarrojo excelente indicador de problemas de montaje incorrecto de rodamientos y lubricación inadecuada que pueden producir sobrecalentamientos (por exceso o falta de grasa, usar grasa en lugar de aceite, tolerancias de montaje mal calibradas).

Medidas de pulsos de choque. Basado en el principio de emisión de ondas de presión extremadamente de corta duración, originadas por las irregularidades de los elementos rodantes a través del material del rodamiento y caja.

C) Inspecciones acústicas

El ruido se propaga en fluidos (aire, agua, sólidos, líquidos) y se le considera como una vibración audible originada involuntariamente en el rango frecuencial entre 20 y 20.000 Hz. y desde 0,0002 a 200 μ bar de presión sonora. Los análisis sonométricos usualmente no se realizan con filtros de banda estrecha, aplicados en caso de vibraciones, por la imposibilidad de identificar fuentes responsables de todas las frecuencias.

La sonometría como método de diagnóstico se recomienda cuando las fuentes de ruido están por lo menos a 10 dB por encima del ruido de fondo, o no existen aparatos e medida de vibración para análisis detallados, también cuando los sistemas inspeccionados emiten ruidos relativamente de alta frecuencia, fácilmente distinguible por sonómetro.

El oído humano es sensible a cambios de 3 dB o más, pero el sonómetro puede registrar aún a más pequeños intervalos como 0,5 decibelios (dB), por lo que es obvia su ventaja en la medida de ruido para diagnóstico.

Este método de diagnóstico debe considerarse como complementario de la medida y análisis de vibraciones mecánicas.

D) Ensayos tribológicos.

La tribología nace en los años 60 en la Gran Bretaña, junto al programa gubernamental de reducción de los costos energéticos de producción en la industria, por concepto de fricción y desgaste de elementos de sistemas industriales.

Se trata de una multidisciplina tecnológica que abarca los siguientes aspectos:

- Estudio del comportamiento de la energía y el material en contacto intersticial de dos sistemas físicos, con énfasis en fricción, desgaste y lubricación.
- Determinación de coeficientes de fricción a base de datos analíticos y experimentales, su modificación y recomendación es para mejorar el diseño.
- Cálculo y análisis de mecanismos de desgaste (abrasión, adhesión, erosión y otros).
- Mejora de lubricación a través del comportamiento de las grasas y los aceites en condiciones de operación
- Diseño óptimo de juntas tribológicas.

Ferrografía y ferroscofia. Estos métodos combinan el uso de microscopios con análisis de partículas de diversos orígenes, basándose en la separación magnética de partículas por su tamaño, parecidos a los ensayos metalográficos.

Análisis de lubricantes. Este método tribológico ya está ampliamente aceptado para diagnósticos en condiciones industriales, especialmente en el sector minero, tanto de los aceites, como de las partículas de desgaste que se pueden encontrar en ellos. Inicialmente dichos análisis se hacían en laboratorios de los proveedores de aceites, pero actualmente existen aparatos y minilaboratorios con reactivos para analizar dichos productos en el lugar de trabajo.

Existen métodos avanzados de análisis de productos de desgaste en lubricantes, tales como espectrómetro de emisión o de adsorción atómica. Y el seguimiento de estado de aceites se enfoca hacia:

- Contaminación y sus orígenes.
- Detección de tipos de partículas en aceite y su geometría.
- Determinación de causas de averías en forma indirecta.

En los análisis de los aceites se observan, cambios del ingrediente básico (aceite), cambios en los aditivos, y cambios a causa de contaminación.

Los cambios químicos ocurren debido a procesos de oxidación, siendo la temperatura un factor decisivo. Como resultado se desarrollan ácidos y alquitrán.

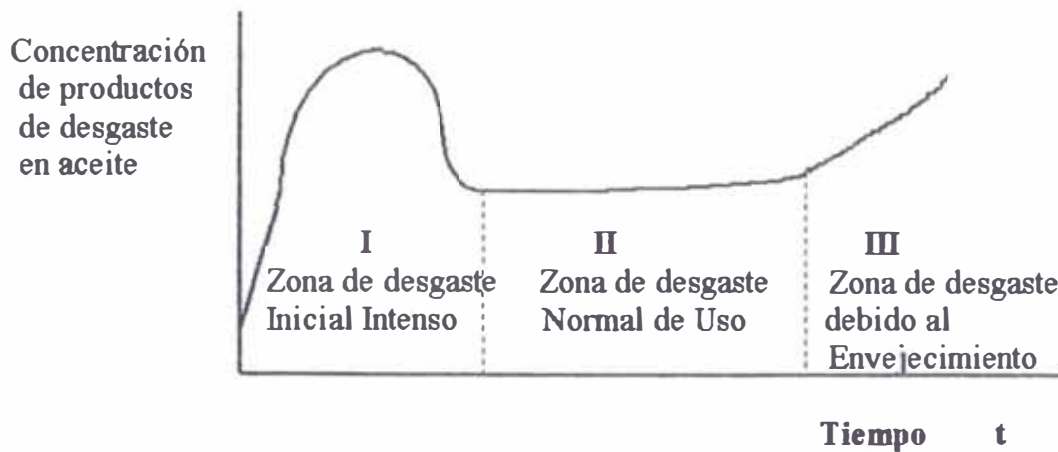


Figura 2.13 Concentración de partículas de desgaste en aceite.

La contaminación se produce a causa del agua, polvos y suciedad del exterior, existencia de productos de desgaste y debido a mezclas de refrigerantes u otros fluidos de trabajo. Generalmente se analiza la viscosidad, la temperatura de la llama (flama), el pH, el contenido de sólidos en suspensión, las cenizas y el agua.

El desgaste de una pieza o elemento como parte integrante de un sistema del equipo se puede determinar, analizando cada cierto período de tiempo, el grado de contaminación o limpieza de los aceites, con elementos o partículas generalmente metálicos extraños a la constitución del lubricante.

En la figura 2.13. se puede ver el grado de concentración de elementos de productos desgastados en el lubricante, diferenciándose tres zonas en función al tiempo de servicio del equipo. La primera zona es de desgaste inicial intenso, debido a que todos los mecanismos están nuevos y presentan mayor fricción entre ellos. La segunda zona es de desgaste normal moderado, debido al trabajo y uso. Mientras que en la tercera zona de desgaste se incrementa la concentración de partículas de productos desgastados, por el envejecimiento de la pieza, y estar trabajando casi al límite de su vida óptima.

En el cuadro 2.1. se relacionan algunos elementos químicos como productos de desgaste y su fuente más probable en términos de elementos de máquinas, como resultado de un análisis espectrométrico.

Cuadro 2.1

Tabla de posibles fuentes de partículas de desgaste según sus elementos químicos.

ELEMENTO QUIMICO	PROCEDENCIA DE PRODUCTOS DE DESGASTE
Aluminio	cojinetes, émbolos, suciedad, aditivos
Antimonio	grasa de lubricación
Bario	aditivos, agua, grasa de lubricación
Boro	fluido de refrigeración, agua de mar
Cobre	cojinetes, sistema de refrigeración
Zinc	aditivos, cojinetes, camisas metálicas
Fósforo	engranajes, aditivos, refrigeración
Hierro	cilindros, cigüeñal, oxidación, engranaje
Cromo	cilindros, anillos, engranajes, cigüeñal
Estaño	cojinetes, enfriador
Galio	aditivos, medio de refrigeración
Magnesio	agua de mar, cojinetes, aditivos
Manganeso	acero en general, árboles, válvulas
Molibdeno	aditivos, anillos
Sodio	aditivos, medio de refrigeración
Níquel	árboles, anillos, engranajes
Plomo	gasolina, grasa, pinturas, cojinetes
Silicio	arena, suciedad
Plata	cojinetes
Titanio	resortes, componentes de turbinas
Vanadio	válvulas, catalizadores

E) Ensayos no destructivos

El propósito de este grupo de técnicas y aparatos es la detección de fallas en diversos materiales, tanto en la superficie como en el interior.

Líquidos penetrantes. Son reactivos químicos, cuya aplicación descubre la presencia de fisuras superficiales en materiales, que normalmente no podrían ser vistas. Debido a su poca tensión superficial, los reactivos penetran en las fisuras, y líquidos reveladores hacen contrastar en color para observar con mayor facilidad.

Extensometría. Se basa en medidas experimentales de esfuerzos y deformaciones en materiales, utilizando fenómenos de cambio de resistencia eléctrica con deformación, según la Ley de Hooke. Existe una variante económica cualitativa de ensayos extensométricos, llamadas comúnmente lacas frágiles (barnices quebradizos), cuya característica es que al secar forman capas delgadas de muy baja resistencia y alto módulo de elasticidad de Young.

Al aplicar esfuerzos, se fisura la capa en líneas perpendiculares a las direcciones de los esfuerzos principales. Estas técnicas son predictivas en forma limitada pero se recomiendan como servicios periódicos externos, sobre todo para estructuras de gran importancia.

Partículas magnéticas. Se aplican para detectar fallos en superficies ferromagnéticas, aplicando polvos metálicos y luego, mediante bobinas eléctricas, se induce un campo magnético que causa orientación de partículas alrededor de fisuras. Este método es económico, pero cualitativo.



Figura 2.14 Esquema de métodos básicos no destructivos

Corrientes parásitas. Estos métodos alternos, se aplican en materiales ferromagnéticos, basándose en el principio de perturbación de campo electromagnético por corrientes de Eddy y otros fenómenos.

Ultrasonido. Es probablemente el método no destructivo de mayor aplicación en la industria. se basa en el principio de emitir ondas ultrasónicas, para medir su reflexión por obstáculos, efectuando luego, la defectoscopia en la pantalla del aparato medidor.

Radiografía y gamagrafía. Usado para verificar la calidad de uniones soldadas, frecuentemente se recurre a los métodos defectoscópicos basados en el efecto de Rayos X. Estos métodos son fiables y de máxima calidad, pero son muy costosos para programas de

mantenimiento predictivo, por lo que solo se justificaría en el sector químico o petroquímico.

F) Inspecciones térmicas.

Termometría. La temperatura es un parámetro muy relevante para el diagnóstico del estado de procesos termodinámicos en general. Esta influencia sobre sistemas, componentes o elementos se manifiestan a veces de la siguiente manera:

- Temperaturas extremadamente bajas aumentan la fragilidad de metales (particularmente crítico para uniones soldadas).
- Con el aumento de la temperatura disminuye la viscosidad en la mayoría de fluidos newtonianos.
- La actividad química (precipitación de carbonatos del agua, corrosión, oxidación de aceites) crece con la temperatura.
- Con el aumento de temperatura se incrementan pérdidas de calor (segunda ley de termodinámica).
- Las propiedades mecánicas de los aceros, en general, se alteran con el aumento de temperatura (decrece el módulo de elasticidad y límite de deformación).
- Las dilataciones térmicas aumentan, alterando tolerancias y generando esfuerzos térmicos, siempre cuando se incrementa la temperatura.
- Influencia de temperatura en el comportamiento de metales y condiciones de tratamiento térmico, consiste en alterar la estructura cristalina, precipitación de carbono, revenido y similares.

F.1. Sensores de contacto

- 1) **Termómetros de expansión de fluidos**, (alcohol, mercurio).
- 2) **Sensores bimetalicos**, (para temperaturas moderadamente altas, no son fiables para medidas superficiales).
- 3) **Termopares**, funcionan mediante un cambio de la fuerza electromotriz en función de la temperatura.

4) **Termoindicadores**, son elementos pasivos que cambian alguna propiedad a cierta temperatura determinada (coloración, se funde). Sirven como medio de control de sobrecalentamiento en ciertos elementos o sistemas.

F.2 Sensores sin contacto

- 1) **Pirómetro óptico**, se basa en la propiedad de los metales (aceros), que por encima de los 500 °C las radiaciones térmicas se vuelven visibles, permitiendo comparar el color de los filamentos de medición con la coloración del objeto medido.
- 2) **Pistola termométrica**, éste instrumento mide temperaturas por efecto de radiación de elementos estáticos y móviles en un amplio rango de -20 a 1650 °C. En materiales sólidos o fluidos.
- 3) **Termovisión y termografía**, Una moderna cámara termográfica parcializa el campo visual en pequeños fragmentos, y luego traduce la radiación infrarroja en visible. Permitiendo proyectar o graficar las imágenes obtenidas, sintetizando campos de diferente coloración según potenciales térmicos.

G) Medida de magnitudes físicas en general

Corrosión. Se emplean métodos como: Medida de potencial de corrosión y resistencia de polarización; Corrosímetro (basado en elementos eléctricos que se incluyen en el sistema controlado, registrando aumento de capas corroídas por cambio de resistencia eléctrica); Sonda de hidrógeno (este método revela la presencia de hidrógeno que se libera en la corrosión); Ultrasonido (registra adelgazamiento de paredes por corrosión).

Presión. Es un excelente método de diagnóstico de condiciones de sellado y empaquetaduras en sistemas hidráulicos.

2.3 PLANIFICACION Y PROGRAMACION COMO GESTION DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento en sus orígenes solo era una simple reparación de aquellas averías que ocurrían aleatoriamente, el mantenimiento preventivo introdujo la segunda generación de la

organización del mantenimiento y, posteriormente, la gestión y la planificación dentro de ella introduce lo que podríamos denominar tercera generación en la organización del mantenimiento, la información del mantenimiento predictivo se puede considerar como la cuarta generación.

En mantenimiento los aspectos de gestión en general se caracterizan por la gran cantidad y complejidad de datos que influyen en la decisión final. Ello comporta siempre elevados costos en el proceso productivo. Esto exige la búsqueda de métodos más rápidos y seguros para el tratamiento de la información que sirvan sobre todo para mantener actualizados los datos referentes a las reparaciones, a las causas de fallos y a los costos correspondientes.

Esta información sería de elaborar a mano, por lo que se recurre a procesos informáticos de datos que ofrezcan rapidez y fiabilidad a la gestión y planificación del mantenimiento en la industria minera.

2.3.1 LA PLANIFICACIÓN EN EL MANTENIMIENTO.

Comprende el orden que hay que dar al trabajo para realizarlo, en el plazo, con el costo y la calidad prevista, que conforman las líneas maestras del mantenimiento durante el próximo ejercicio, fijando los objetivos fundamentales y determinando las estrategias para conseguirlos. Es necesario diferenciar planificación y programación, ambas son funciones de la gestión de mantenimiento, la planificación comporta decisiones básicas y su ejecución corresponde a la dirección, mientras que la programación está relacionada más con la secuencia de trabajos que cada operario debe realizar día a día o semana a semana, no comporta decisiones básicas y su ejecución le corresponde a los niveles jerárquicos inferiores del mantenimiento.

La planificación la realiza generalmente la Dirección de mantenimiento en coordinación con la Dirección Técnica, la Ingeniería de mantenimiento y los distintos Jefes de Áreas de mantenimiento. Para ello, hay que disponer de una Oficina de Planificación, programación y Estudios Mecánicos, otra análoga para el Servicio Eléctrico y una Oficina de Pedidos y Administración. La planificación se efectúa durante un período limitado, próximo al comienzo del ejercicio siguiente, de forma que se disponga de tiempo suficiente para

elaborar y aprobar el presupuesto antes de que comience el nuevo ejercicio. Basándose en la información acumulada en las experiencias anteriores, datos como:

- Número de equipos y tipos de maquinaria a mantener.
- Procedimientos técnicos a seguir en función del plan de mantenimiento preventivo y predictivo de equipos, basado en los archivos históricos de averías.
- Resultados obtenidos en ejercicios anteriores con recursos propios y los obtenidos en las contrataciones

Las funciones de la dirección de mantenimiento por lo tanto debe ser:

- Planificación del mantenimiento.
- Elaboración del presupuesto.
- Evaluación continua del trabajo ejecutado y control de lo presupuestado.

Las funciones de ejecución son aquellas otras que realizan los operarios cuando dedican su actividad cotidiana a la conservación y consisten en:

- Programación y emisión de la orden de trabajo.
- Ejecución física de la orden de trabajo.
- Redacción del parte de trabajo o información.

Estas funciones de ejecución son además susceptibles de ser realizadas con cierta facilidad con medios contratados en el exterior.

La planificación dentro de la gestión. El sistema de gestión de mantenimiento es un procedimiento integral de organizar las actividades de mantenimiento de manera que se pueden planificar, organizar, coordinar y evaluar en forma continua, basándose en datos actuales de acceso instantáneo.

A) Planificación. Toma de decisiones que fijan los objetivos de la conservación a efectuar sobre un conjunto de equipos. Dar lugar a unas cargas de trabajo, valoradas mediante la función de presupuestos.

B) Presupuesto. Lo confecciona la dirección, de acuerdo con las anteriores premisas, requiere la actualización continua de costos de materiales, repuestos, materiales, insumos y mano de obra. Para luego evaluar y programar el trabajo.

C) Ordenes de trabajo. Deben recoger datos del ejecutor con la descripción del trabajo realizado, análisis de la causa de la actuación, horas de trabajo acumulado desde la última intervención, horas de inactividad de la máquina, mano de obra, partes o vales de salida de material del almacén y contratos empleados. Se establecen con la periodicidad necesaria para los operarios o equipos de mantenimiento. Sin embargo, y de forma variable, se reprograman las OT de mantenimiento de acuerdo con las incidencias acumuladas y éstas órdenes son las que sirven de base al supervisor o capataz para decidir las órdenes diarias de trabajo para su ejecución.

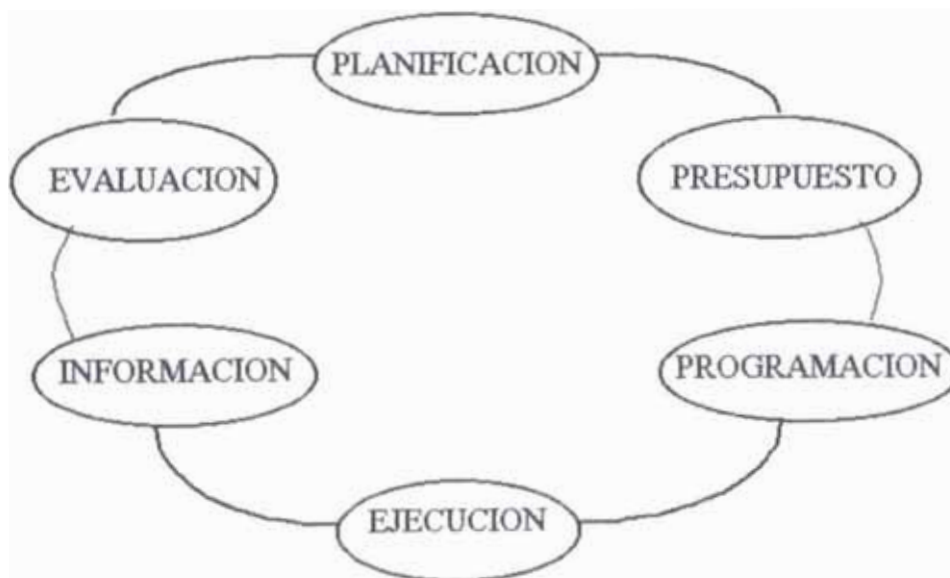


Figura 2.15 Sistemas de gestión de mantenimiento (S.G.M.)

D) Programación de trabajo. Una vez planificado y presupuestado el mantenimiento, se dispone de un plan anual y una carga de trabajo que incluye recursos humanos, repuestos y materiales que hay que poner en marcha mediante las órdenes de trabajo (OT).

E) Ejecución. La ejecución física de la conservación corresponde a los operarios asignados bajo el control del supervisor o capataz y se efectúa de acuerdo con las OT mensuales, semanales y diarias, que recogen el conjunto de paradas programadas y órdenes de mantenimiento. El control de la ejecución se efectúa mediante la información de los partes de trabajo.

F) Información. La complementación de los partes de ejecución corresponde a los propios operarios o jefes de equipo, representan el medio básico de comunicación entre quienes realmente ejecutan el trabajo y los que lo dirigen. La información irá almacenada en los archivos históricos y en el inventario de equipos, entendiendo éstos como:

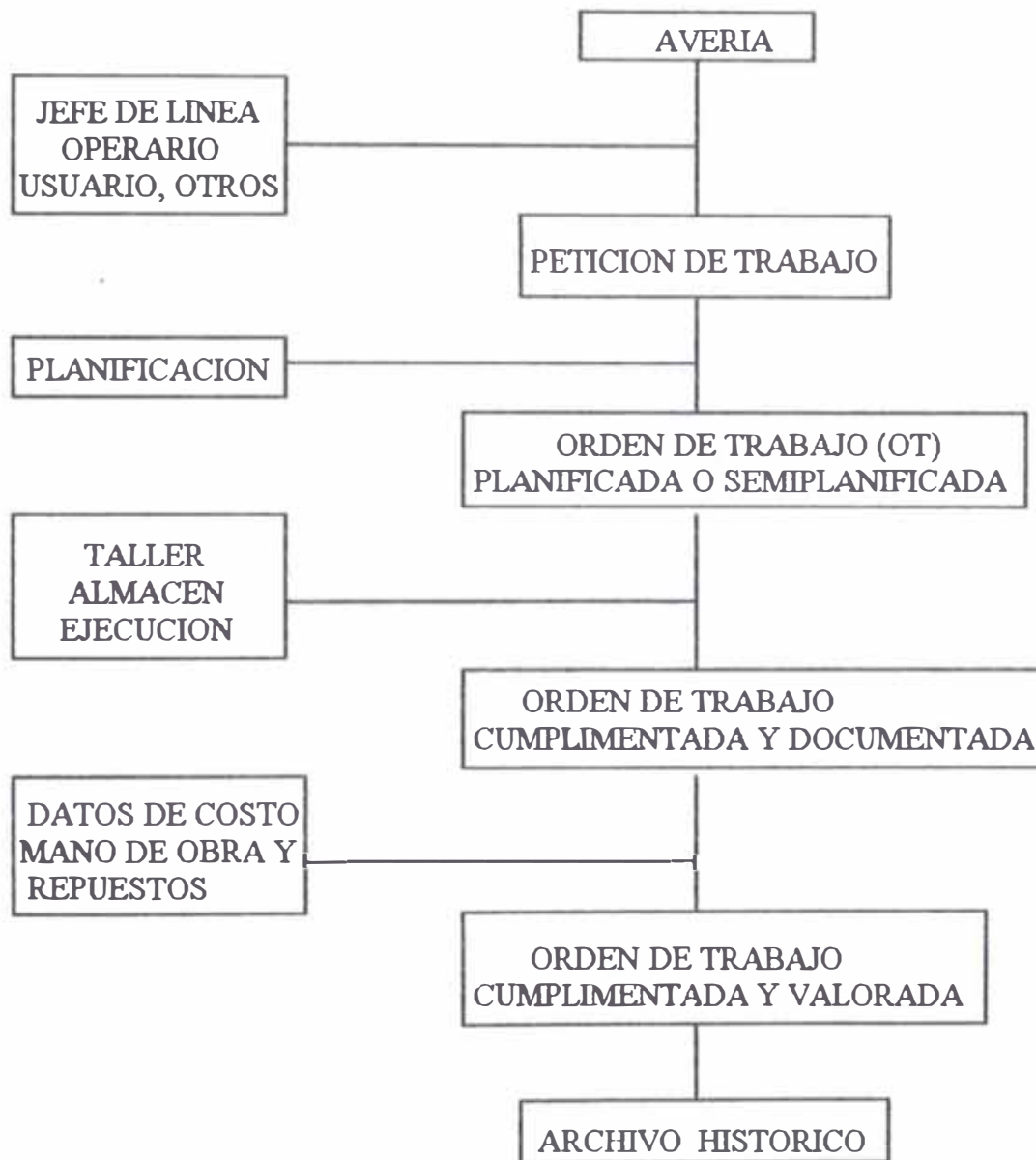


Figura 2.16. Forma de almacenar información en un archivo histórico

Cada una de las fichas del archivo histórico incorpora datos de una avería recogidos de distintos fuentes de acuerdo con el gráfico secuencial, adjunto en la figura 2.16.

F.1. Inventario de equipos. Es la relación completa de los equipos, instalaciones y edificios a mantener incluyendo todos los datos necesarios para el mantenimiento. Un inventario es costoso de crear y necesita una constante **actualización** para no quedar obsoleto.

El inventario resulta imprescindible para planificar el mantenimiento y confeccionar el presupuesto ya que los elementos a mantener tienen distintos tratamiento estratégicos como mantenerlos, mejorarlos o desecharlos.

En la estructuración de un inventario se definirán claramente ciertos conceptos como: Unidad productiva (parque de vehículos), instalación (taller mecánico), Máquina (pala), Componentes y Repuestos.

F.2. Archivo histórico. Desde el punto de vista de mantenimiento es un fichero organizado y estructurado de las incidencias ocurridas en todos y cada uno de los equipos del inventario, desde su fecha de instalación o puesta en operación.

G) Evaluación. Los partes de trabajo cumplimentados tienen una doble función: Por un lado permiten conocer y controlar de forma continua el grado de adecuación de las actividades previstas a las actividades realizadas y por otro, una vez debidamente valoradas, permiten conocer y controlar de forma continua los costos de mantenimiento, **comparando** los casos realizados con los programados o previstos. La evaluación es **realizada** por la dirección y le permite planificar de forma adecuada el mantenimiento

2.3.2 OBJETIVOS Y ESTRATEGIAS DE LA GESTION EN MANTENIMIENTO.

Los objetivos básicos que se fijan para un próximo periodo son:

- Fijación de la disponibilidad o limitación del tiempo de paradas no previstas de producción y su relación con el ejercicio anterior.
- Fijación del presupuesto de mantenimiento y su relación con el ejercicio anterior.

El cumplimiento de los objetivos requiere una revisión del mantenimiento que se lleva actualmente y tomar una serie de decisiones que permiten la consecución de los mismos y cuyo conjunto constituyen la estrategia del ejercicio. Estas decisiones se puede clasificar en los siguientes grupos:

A) Decisiones tecnológicas encaminadas a mejorar los índices de disponibilidad, entre las que se puede señalar:

- Revisión del inventario incluyendo y actualizando datos.
- Revisión del Plan de Mantenimiento Preventivo y Predictivo incluyendo o sustituyendo equipos, tecnologías, materiales y horas asignadas a los operarios.
- Rehabilitaciones en equipos de alto costo de mantenimiento y excesivas paradas.
- Revisión del stock de repuestos, eliminando duplicidades, seleccionando proveedores y materiales.

B) Decisiones estratégicas, relacionadas con la política general de la empresa, como:

- Prioridad de medios propios o contratados.
- Obsolescencia de equipos, líneas o productos y el tipo de mantenimiento a seguir.
- Estructura interna de los contratos de mantenimiento que definen la política que los configuran.
- Logística de aprovisionamiento en general.

C) Decisiones relativas al personal afecto, entre las que se destacan:

- Incentivos de tipo económico o testimonial.
- Entrenamiento, formación y selección del personal de mantenimiento.
- Política general de personal.

2.3.3 ESTABLECIMIENTO DE PLANES DE TRABAJO.

Los planes de trabajo resultan de agrupar actividades según la frecuencia de intervención en la máquina, lo cual nos permite planificar la utilización de nuestros recursos humanos y materiales. Estos pueden ser:

Lubricación. Comprenden los cambios de aceites y filtros según frecuencias establecidas.

Revisiones diarias. Incluye las inspecciones básicas, como el reportaje, la comprobación de niveles de fluidos y el engrase que se realizan en general cada 24 horas de trabajo.

Inspecciones con maquina en marcha. Su frecuencia corresponde a períodos inferiores que las revisiones rutinarias y deberá realizarse antes que éstas, con el objeto de corregir las anomalías detectadas.

Intervenciones programadas. Engloban verificaciones complejas como ajustes y pequeñas reparaciones programadas. La diferencia con las revisiones rutinarias estriba en las horas-hombre a emplear y el tiempo de inactividad de la máquina que, por lo general, son mayores que en los casos anteriores.

Reparaciones programadas. Recoge todas las reparaciones de los conjuntos y componentes de la maquinaria. Estas se ejecutan a partir de las 2000 horas trabajadas. La frecuencia de intervención, por lo general, está definida por la vida estimada de los conjuntos o sistemas de la maquinaria.

2.3.4 LA PROGRAMACIÓN EN MANTENIMIENTO.

Para programar el mantenimiento es necesario conocer las horas de trabajo acumulado de cada máquina y las horas de trabajo previstas para cumplir con la tasa de producción que se asigna. Una vez conocido estos datos se realizan los planes de trabajo en función de las horas a trabajar por año.

Programación a corto plazo. Por lo general es semestral contemplando programas de ejecución inmediata ya previstos y permite formular peticiones de materiales y repuestos con un tiempo prudencial, a fin de no tener demoras en la ejecución de los trabajos, también permite controlar las desviaciones respecto al programa previsto y corregir la programación a medio plazo.

Programación a mediano plazo. Es bianual y de gran importancia para la confección de los presupuestos anuales, para controlar la ejecución de los trabajos, como ayuda para reducir

el inmovilizado de los materiales de almacén y los pedidos de emergencia y para mejorar la relación con los proveedores consiguiendo suministros de calidad.

Programación a largo plazo. Se puede hacer a diez años vista, es la más importante económicamente y nos informará sobre:

- ◆ Disponibilidad anual media de la maquinaria.
- ◆ Gasto anual horas hombre y en materiales para mantenerla.
- ◆ Horas de parada por mantenimiento de la máquina.
- ◆ Necesidades anuales de personal de mantenimiento.
- ◆ Calendario de sustitución de la maquinaria.

Disponiendo de datos sobre la rentabilidad de nuestro mantenimiento, permite modificarlo si es necesario. También da la posibilidad de encaminar la renovación de la maquinaria con alternativas como: Hasta donde reparar, sustituirla por vejez u obsolescencia técnica, y/o adquirir otras de mayores prestaciones.

Para valorar la alternativa a elegir y determinar una programación racional a largo plazo acorde con la política de la empresa, rentabilidad de los equipos incorporando los factores financieros, es necesario tener en cuenta el estado de la máquina usada (Capital pendiente de amortizar, valor residual, costo de operación y mantenimiento, gasto por la renovación) y el de la máquina nueva ha adquirir (valor de la inversión, gasto anual previsto durante la vida de la máquina y adaptación de la infraestructura existente sobre todo el de mantenimiento a la nueva maquinaria).

2.4 ORGANIZACION DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO

El tamaño de la organización de mantenimiento debe estar en función de la calidad de servicio que necesita la maquinaria para operar y cumplir con la producción asignada, los equipos y las instalaciones deben estar proporcionados. En una explotación minera de gran tamaño quizá sea necesario incluso organizar departamentos separados por el tipo de servicio que prestan, mientras que en la pequeña minería bastará un pequeño taller.

En una pequeña o mediana empresa utilizan, en general, las mismas personas para instalar y luego para reparar los equipos, ya que no puede disponerse de tantas personas con diferentes oficios para separar ambas funciones, diferencias que después se reflejan en los métodos y resultados cuando se calculan tiempos y sobre todo costos.

2.4.1 INFRAESTRUCTURA Y RECURSOS DE MANTENIMIENTO.

Toda infraestructura organizativa en mantenimiento debe estar en condiciones de cumplir y responder por lo siguiente:

- ◆ Recopilar toda información posible sobre las máquinas e instalaciones que va a mantener, formando un eficaz fichero de características, en donde, además, aparezca la referencia de pedido, valor, situación, recambio, etc.
- ◆ Un examen periódico de estas fichas nos indicara las partes del equipo que deben irse excluyendo, porque no se tiene interés de mantenerlo cuando sus costos de inspección y revisión sean superiores a los de reparación o incluso sustitución de la pieza averiada.
- ◆ Establecer los ciclos de vigilancia y hacer registros de inspecciones de trabajos realizados en conceptos de recambio, reparación y conservación.
- ◆ Examen crítico para poner en evidencia los elementos que requieren mayor protección.
- ◆ Establecer el programa final de conservación, consiguiendo los costos mínimos, evitando las frecuentes visitas de los inspectores, pero que tengan en cambio la máxima eficacia.

2.4.1.1 Instalaciones fijas para mantenimiento.

A) Estación de lavado.

El ambiente en el que trabajan los equipos mineros en una explotación a cielo abierto, pasan del polvo al barro y en ambos casos es necesario lavar las máquinas para que mantenimiento las inspeccione y así pueda detectar fisuras ocultas, pérdidas de líquidos, ausencia de pernos y otros como pérdida de potencia y rendimiento que son causas de averías. Por ello, el lavado debe incluirse en los programas de mantenimiento, normalmente con una frecuencia semanal y siempre que una máquina entre al taller debe pasar por el lavado.

Este debe ser amplio, lo suficiente para permitir la entrada de las unidades de mayores dimensiones y si fuese cubierto con altura suficiente para levantar las cajas en caso de los camiones principalmente. Desde su diseño debe considerarse la limpieza de la cantidad de barro y piedras que quedan en él.

Actualmente hay tres tendencias en máquinas de lavado: Agua caliente, Fría y Vapor; con posibilidad de poder añadir detergentes y funcionan generalmente a presiones superiores a 1.013,25 Kpa (10 Atmósferas).

B) Estación de servicio

Lugar donde se hacen los reportajes, los cambios de aceite y las revisiones sistemáticas de los equipos móviles. Estas deben realizarse eficazmente en el menor tiempo posible, por lo que la estación de servicio debe estar implementada con unos aparatos de adecuados, espacio suficiente, bien iluminado y sobre todo limpio y ordenado. Toda estación de servicio debe disponer de depósitos para combustible, surtidores de despacho, aceites y grasas, colectores de aceites usados, instalación de aire comprimido, stock de filtros y neumáticos, cargadores de batería y otros.

En la actualidad algunas explotaciones mineras cuentan con estaciones implementadas con instrumental moderno de gran caudal para vaciado y relleno rápido de combustible, que brindan seguridad e impermeabilizan de suciedad los depósitos.

C) Taller de reparaciones.

La capacidad de servicio de un taller de reparaciones para maquinaria minera, debe estar en relación con el tamaño y naturaleza de la flota, tipo de trabajo que se quiere dar, rendimiento y productividad del personal, espacio disponible. Todo taller de reparaciones de una mina debe tener la capacidad de atender al total del parque de maquinaria de la explotación minera, para ello, tiene que contar con ambientes para oficinas, para almacén de repuestos y cubiertas, para albergar herramientas, para naves de reparación y mantenimiento apropiados al tamaño de los equipos, para el área de engrase y pozo colector de aceites usados, entre otros más.

Su diseño afecta tanto a la inversión en edificios, al herramental y utillaje como al proceso productivo. Por lo que debe ser diseñado para lograr un bajo costo de reparaciones, reducir al mínimo el tiempo perdido en ellas y proporcionar un ambiente seguro al personal de mantenimiento. Teniendo en cuenta los aspectos siguientes:

Tamaño de la flota. El edificio no solo debe albergar el equipo de mayor tamaño a excepción de algunas excavadoras y perforadoras que casi nunca van al taller, sino que pueda atenderse simultáneamente a varias unidades con la posibilidad de maniobrar piezas voluminosas en su alrededor. Es imprescindible contar con un puente grúa con capacidad mayor que la pieza más pesada de la flota de maquinaria, así como extraer la transmisión de las unidades de transporte, operación realizada con el basculante levantado. En la figura 2.17 se aprecia la nave. Por lo menos un módulo debe estar previsto para recibir máquinas de orugas, lo que implica tener un piso con carriles, hormigón endurecido o bandas de goma. Es recomendable motorizar los mecanismos de cierre y apertura de las puertas del taller, cuando sea necesario por climatología y presencia de polvo.

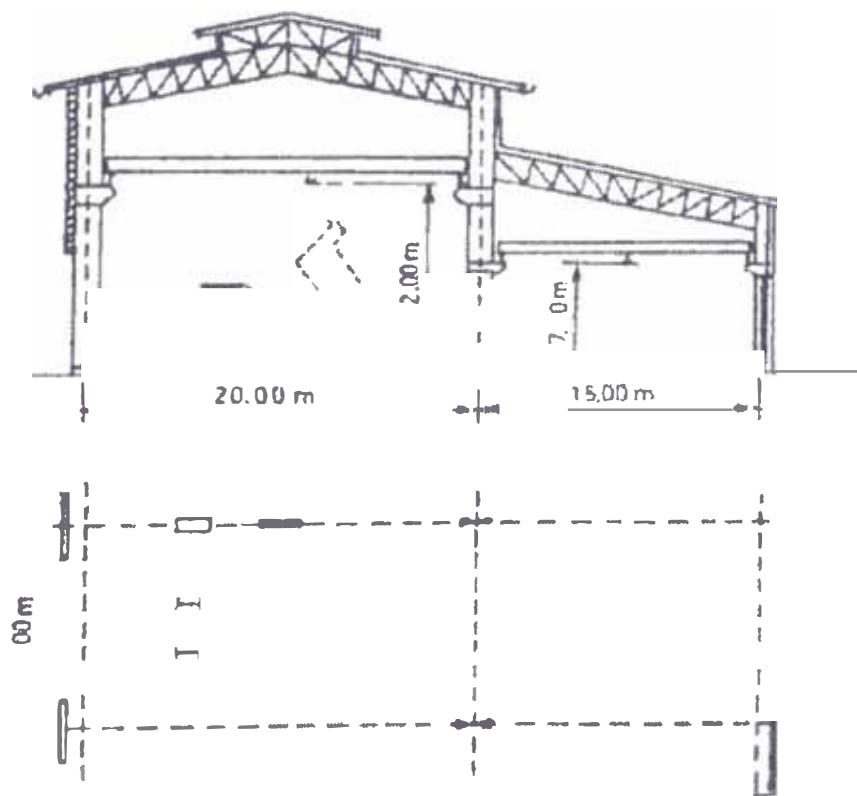


Fig. 2.17 Vistas de perfil y superior de la nave de reparación de equipos.

Tipo de trabajo a realizar Está en función a la proximidad de otros talleres y servicios existentes en el sector, teniendo presente el tamaño y naturaleza de nuestra maquinaria, así como el servicio y la comunicación de talleres especializados de los distribuidores y fabricantes de maquinaria minera.

Estos últimos permiten alcanzar un cierto ahorro al no tener que adquirir herramental costoso y sofisticado que necesita personal muy especializado para su manejo, o en todo caso coordinar un programa de intercambio de componentes y conjuntos con los proveedores.

Por lo tanto, el herramental y utillaje necesario será distinto según lo que se quiera reparar y hasta que nivel de diagnóstico se quiera llegar para la conservación de nuestros equipos. El taller debe contar además con una instalación de aire comprimido, red eléctrica de fuerza y alumbrado.

Rendimiento y productividad del personal. Es la calidad de trabajo efectuado y el tiempo empleado en ejecutarlo, inciden factores como: tener espacio suficiente alrededor de la unidad en reparación, limpieza en el área de trabajo, iluminación adecuada, temperatura, almacén cercano, ausencia de distracciones, buena organización, entre otros.

Espacio disponible para ubicar las instalaciones. Es necesario contar con un amplio espacio alrededor del taller para facilitar maniobras esperas y algunas posibles reparaciones. La ubicación debe ser lo más próximo a la mina y por supuesto fuera de la influencia de futuras ampliaciones y de voladuras.

2.4.1.2 Instalaciones móviles para mantenimiento

Utilizados por mantenimiento para realizar inspecciones de rutina y reparaciones en el lugar de trabajo a los equipos pesados y clasificados como semi-estáticos o cautivos de la explotación minera. Se utilizan también para revisiones de menor frecuencia de determinados equipos móviles como los de orugas, para actuar sobre máquinas que sufren averías grandes y pequeñas en plena mina que les impide llegar por sus medios o por otros hasta el taller principal.

Dependiendo del tamaño de la flota de equipos que tiene la explotación minera, las unidades móviles que debe tener mantenimiento son:

- ◇ Cisterna de combustible.
- ◇ Unidad móvil de engrase y vehículo de electricistas.
- ◇ Unidad autónoma de soldadura eléctrica.
- ◇ Compresores móviles para energía.
- ◇ Grupos electrógenos para iluminación y fuerza.
- ◇ Camión de cubiertas con grúa, energía neumática y utillaje.
- ◇ Grúas móviles diesel-hidráulicas con capacidad según las piezas de las máquinas.
- ◇ Camión taller con: (grúa hidráulica, tornillos de banco, torno, energía neumática, equipos de oxicorte)
- ◇ Otras unidades menores para servicios secundarios.

Igual que en la estación de servicio, la cisterna y el camión de engrase pueden ir provistos de aparatos rápidos y una grúa (hasta 500 Kg) para cambiar los bidones de grasa del sistema centralizado de las grandes unidades. Los medios móviles deben ir provistos de enlace por radio con la central de mantenimiento.

2.4.2 PERSONAL DE MANTENIMIENTO

Los medios humanos formados por la plantilla de mecánicos, electricistas y otros con los que cuenta mantenimiento es fundamental para la buena marcha de los trabajos. Por lo tanto, habrá que definir el tipo de trabajo que se quiere realizar y el nivel de los mismos en las distintas especialidades. Para ello, se buscará el personal más idóneo profesionalmente y si es posible, con experiencia, sin descuidar la formación permanente sobre nuestros equipos, en coordinación con los fabricantes y proveedores del ramo.

Aunque calcular el tamaño de la plantilla siempre es difícil, ésta debe satisfacer las necesidades de personal por mantenimiento para cumplir con las actividades destinadas a conservar la maquinaria en óptimas condiciones durante su vida útil, considerando ciertas intervenciones repetitivas de mantenimiento al contar con máquinas similares en tecnología

y marca, lo que permite planificar, programar y controlar el mantenimiento, conviene normalizar ciertas actividades mediante lo siguiente

- ⇒ Estudiar en detalle el trabajo de cada actividad con datos específicos, así como el utillaje, medios a emplear y normas de seguridad que habrán de seguirse para realizarlo de forma eficiente y segura.
- ⇒ Desglosar cada actividad en sus fases de ejecución, asignando a cada una de ellas las horas hombre y la cualificación necesaria del personal para realizarlo así como el tiempo que estará parado el equipo.
- ⇒ Concretar el repuesto adecuado “standard” en la reparación para conseguir que el conjunto o componente reparado alcance las horas de trabajo previstas, con la máxima fiabilidad al mínimo costo posible.

También se debe tener en cuenta los tipos de mantenimiento a realizar, considerados en la programación a corto, medio y largo plazo como son:

Mantenimiento programado y correctivo. Considerando una flota de máquinas en buen estado y operadores entrenados, se asume las horas-hombre precisas para realizar las actividades sobre las máquinas y reparar las averías, contratando en exterior cuando se presenten picos. Si el mantenimiento es adecuado los requerimientos serán mínimos y si es pésimo nunca se tendrá el personal suficiente.

Supervisión. Una vez cubiertos los puestos básicos de la organización, determinaremos el número de supervisores de primera fila necesarios en cada área o sección para dirigir y controlar el trabajo. El número de operarios por supervisor dependerá del tipo de trabajo, rutina, dispersión y otros.

Trabajos de administración y servicios. Aquí se incluyen el personal para planificación, mantenimiento de instalaciones, servicios diversos, limpieza entre otros.

2.4.2.1 Formación del personal de mantenimiento

Poca incidencia se tiende en conocer perfectamente los métodos y los medios necesarios para realizar mantenimiento, si no disponemos del personal cualificado que lo lleve a la práctica con la calidad necesaria. Estos programas de formación deberán dirigirse tanto a los operarios como a los supervisores con el fin de incrementar sus conocimientos y habilidades, mejorar la calidad de servicio y la comunicación entre el personal de mantenimiento, fundamentalmente deben incluir.

Para operarios. Conocimientos sobre tecnología general y específicos de la maquinaria utilizada, métodos de trabajo y normativa de seguridad.

Para supervisores. Formación tecnológica y normativa de seguridad minera, gestión y control.

Los planes de formación permanente dependen del Departamento de formación y deben ser planificados y evaluados por la supervisión de mantenimiento. Su realización será dentro de la jornada laboral con participación de los operarios principalmente.

2.4.2.2 Incentivos y primas para el personal de mantenimiento.

Aunque en el sector minero no está garantizado el pago de incentivos. Es quizá el punto en el que no se puede dar un criterio único a seguir, se puede considerar remuneraciones constantes o variables en función del trabajo realizado u horas de paradas de los equipos, también se puede considerar aquellos trabajos dedicados o de mucha responsabilidad. En cualquier caso será necesario el cálculo de los tiempos de ejecución ya que sin este dato es imposible programar las distintas tareas a realizar, ni estimar los rendimientos.

El objeto de los trabajos de mantenimiento es brindar un servicio con calidad, cantidad, tiempo y costo adecuado. Por lo que los incentivos deben estar en relación con los intereses del Departamento y del personal según el tipo de trabajo en mantenimiento que realicen.

2.4.3. RELACIONES DE MANTENIMIENTO CON OTRAS DEPENDENCIAS

La coordinación del departamento de mantenimiento con otros departamentos de la empresa e instituciones externas se deben desarrollar a través de líneas preestablecidas en la política de la empresa e indicadas en su organigrama, basados en el intercambio de información y control de gestiones.

2.4.3.1 Relaciones con la Dirección

Mediante estudios comparativos, rentabilidad de lo propuesto, plazos de ejecución y grado de interferencia con producción, se realizará gestiones como:

- Previsiones de compra, ampliación o sustitución.
- Reacondicionamientos necesarios.
- Introducir modificaciones para conseguir soluciones a los problemas existentes, reduciendo su costo y facilitando el trabajo al personal.
- Unificación de equipos.

2.4.3.2 Relaciones con Operación y Planificación.

La coordinación con estos dos departamentos es fundamental para conseguir el objetivo de lo planificado y programado por la dirección de la empresa minera, mediante reuniones por lo menos semanales. En dichas reuniones el departamento de mantenimiento debe ocuparse de:

- Informar sobre; revisiones programadas, previstas y estado de las máquinas.
- Programar el movimiento de los equipos semimóviles.
- Planificar la distribución eléctrica según planes de operación de la mina.

Al mismo tiempo, las anomalías que surgen a lo largo del día obligan el contacto permanente entre mantenimiento y operación, para de común acuerdo, incluso a veces con el

apoyo de planificación, tomar la decisión más oportuna aunque no lo estuviera anteriormente programada.

2.4.3.3 Relaciones con el Departamento de Logística

Debido al efecto de la globalización la industria minera deberá ser cada vez más competitivo y tender a mejorar la productividad y calidad, esto no sólo se logra con la implementación o adecuación de nuevas tecnologías, sino también depende de la forma de organización y administración de la producción, material, repuestos, insumos, etc. Los cuales deberán de estar a tiempo y en el momento necesario con el mínimo costo, a ello muchos investigadores los denominan “JUST IN TIME” o Justo a tiempo, las que están directamente relacionados con el departamento de logística.

Justo a Tiempo (J.A.T).- Es considerada como una nueva forma de organización empresarial, tiene una filosofía industrial global a mejorar el conjunto de los resultados de una empresa; dentro de los objetivos generales se consideran:

- Mejorar la productividad.
- Minimizar los stocks o inventarios.
- Eliminar todo tipo de desperdicio en todo lugar.
- Reducir los ciclos y costos.
- Mejorar el control de cantidad y calidad en todo proceso.
- Realizar el mantenimiento por los mismos trabajadores
- Reducir todos los plazos y líneas de espera.

Principales condiciones del Justo a Tiempo.- Dentro de las principales condiciones tenemos:

- Producir lo programado, no constituir stocks de productos, repuestos finales o intermedios.
- Tener plazos de respuesta muy cortos y gran flexibilidad para cumplir con la producción.
- Capacidad de efectuar cambios rápidos de equipos y maquinarias.

- Eliminar todas las esperas inútiles haciendo al personal lo más autónomo posible en su trabajo.
- Evitar los manipuleos múltiples y operaciones de descondicionamiento-recondicionamiento; no conviene hacer transitar a los materiales, repuestos, accesorios, insumos por puestos de almacenaje o bodegas intermedios, sino que se distribuya en lo posible directamente al lugar requerido o de trabajo.
- Estar seguro de cumplir con el programa de trabajo planeado y por tanto tener una buena fiabilidad de los equipos y dominar la calidad.
- Aprovecharse sólo de los repuestos, accesorios, insumos, materiales y otros recursos de calidad y lo necesario, para que no se detenga la producción.
- Tener un recurso humano capaz de adaptarse rápidamente y de comprender los objetivos de la empresa.

La coordinación con almacén, mantenimiento deberá consistir en lo siguiente:

- Intervenir en la gestión de stocks y consignaciones.
- Conseguir información actualizada de la existencia.
- Gestionar las compras urgentes y controlar las demoras de los pedidos y velar por una recepción adecuada.
- Formalizar contratos exteriores en el momento oportuno.

2.4.3.4 Relación de mantenimiento con el Departamento de Relaciones Industriales.

Hay que establecer con este departamento la política general a seguir con el personal de mantenimiento en relación a los siguientes aspectos:

- Turnos de trabajo y horas extraordinarias.
- Vacaciones del personal
- Ascensos, premios o primas y sanciones.
- Comidas y transportes fuera de las horas de trabajo normal.

2.4.3.5 Relaciones con Organizaciones Externas.

La carga de trabajo de mantenimiento fluctúa considerablemente y es impracticable tener una plantilla para resolver los picos. Por lo que es necesario a veces recurrir a contratar especialistas externos para realizar trabajos en la mina o fuera de ella, según el entorno geográfico de nuestra instalación, las comunicaciones con otros talleres, empresas proveedoras y fabricantes de maquinaria, para efectuar diversos trabajos como:

- Reparaciones mayores de conjuntos o nuevos montajes.
- Formación y especialización de nuestro personal.
- Refuerzo en puntas de trabajo.
- Mantenimiento y diagnóstico con equipos especiales.

2.4.4. ORGANIGRAMA DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO.

Los organigramas han de perseguir la asignación concreta de responsabilidad y autoridad a cada persona que integra el Departamento de mantenimiento de tal forma que en todo momento sepan ante quién tienen que responder y a quién pueden exigir responsabilidades del funcionamiento de los equipos. Con miras a conseguir esto, se debe disponer el organigrama de tal forma que no haya posibilidad de:

- Duplicidad de responsabilidades.
- Lagunas o vacíos que no correspondan a nadie.

Por otra parte hay que dejar establecido a qué persona tiene que acudir cada uno para informar o para solicitar ayuda una vez agotadas todas sus posibilidades.

A la vez, cada responsable de cualquier centro, ha de saber con total claridad qué datos tiene que facilitar a la Dirección del Departamento y a que tipo de control va ha estar sometida su gestión. Asimismo se le informará de todas las modificaciones que este control haya de sufrir y se le hará partícipe de todas las decisiones que se tomen en cosas que a él le afecten y de las que posteriormente él haya de responder.

Los organigramas de mantenimiento en minería se confeccionan fundamentalmente en función de una distribución de procesos, funciones o tipos de maquinaria.

Un modelo de organigrama por procesos implica una estrecha colaboración entre el personal dedicado a hacer las reparaciones del mantenimiento correctivo y el personal del mantenimiento preventivo incluyendo aquellas actividades consideradas como predictivas. Ver figura 2.18.

En cambio un organigrama por tipos de máquinas es más flexible, coordinado y eficaz definiendo mejor la autoridad y la responsabilidad sobre cada equipo. Ver figura 2.19.

También se acostumbra unificar bajo un solo mando la responsabilidad del mantenimiento de toda la explotación mina, planta concentradora y servicios, según una combinación de las tres organizaciones mencionadas. En todos los casos la relación de supervisores a personal de operarios varía según la especialización de los equipos y el tipo de mantenimiento a dar a los equipos. Este modelo es muy aplicado en la mediana minería de nuestro País. Como se puede apreciar en la figura 2.20.

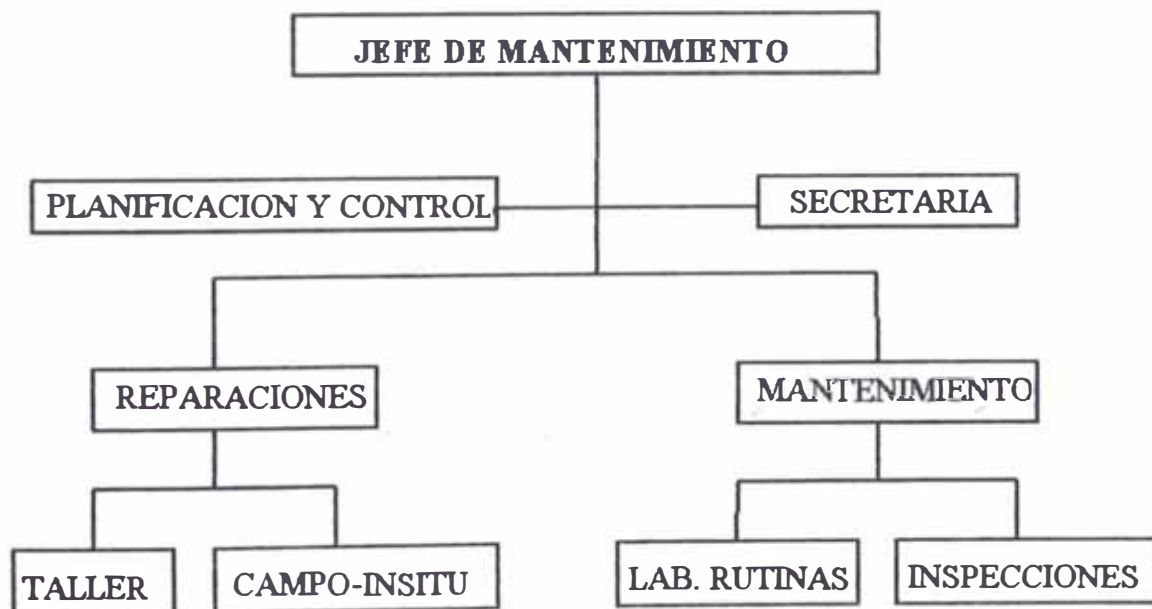


Figura 2.18 Organigrama de mantenimiento por procesos.

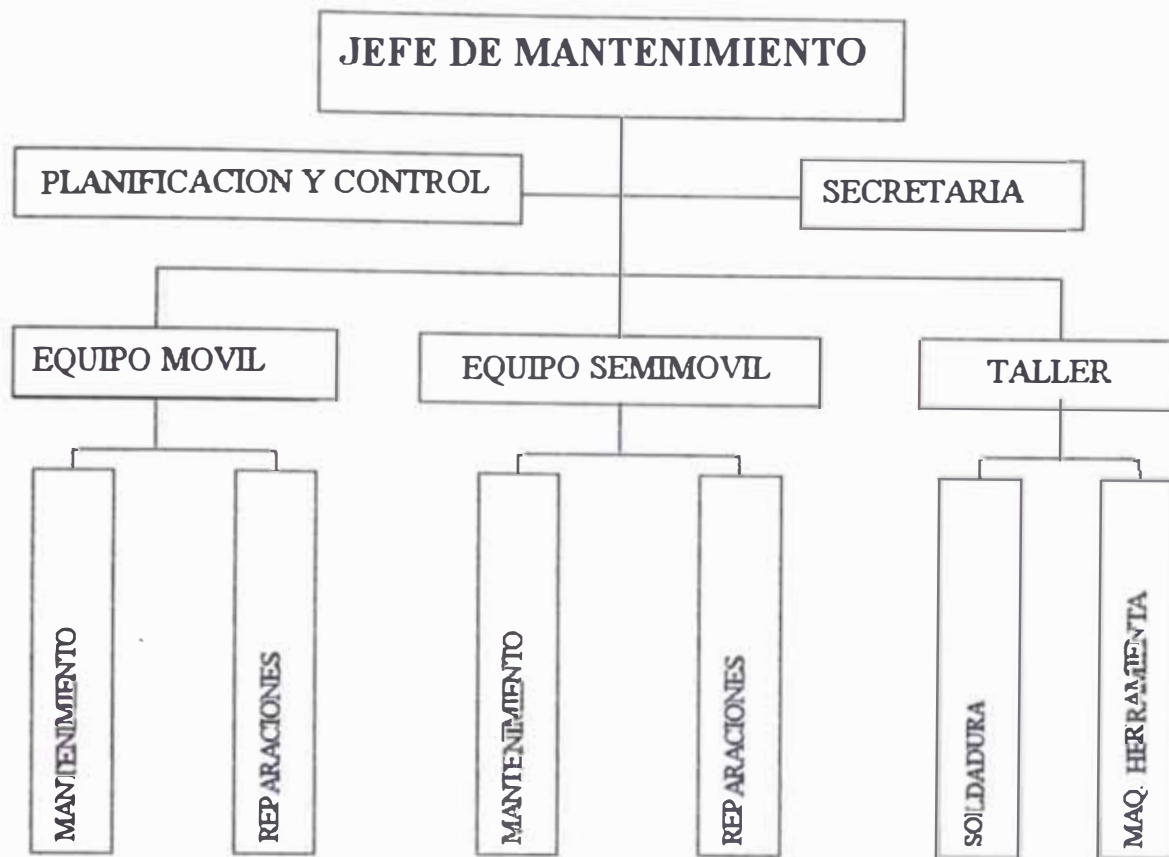


figura 2.19 Organigrama de mantenimiento por tipo de equipos.

2.5. INDICES DE CONTROL DE MANTENIMIENTO

Siendo el objeto del mantenimiento dar la máxima disponibilidad a la maquinaria al mínimo costo posible, durante la vida útil de ésta, la selección de algunos índices de control deberá hacerse atendiendo a este fin. Para ello, será necesario establecer un registro de datos que permita su cálculo periódico.

La acumulación sistemática y ordenada de datos e informes donde se pueda tener archivado todo el historial y sus costos, son esenciales para ejercer un buen control, programar y hacer un análisis rápido y concreto sobre el servicio que presta mantenimiento. Estos índices pueden estar ligados a diversos niveles de producción y mantenimiento.

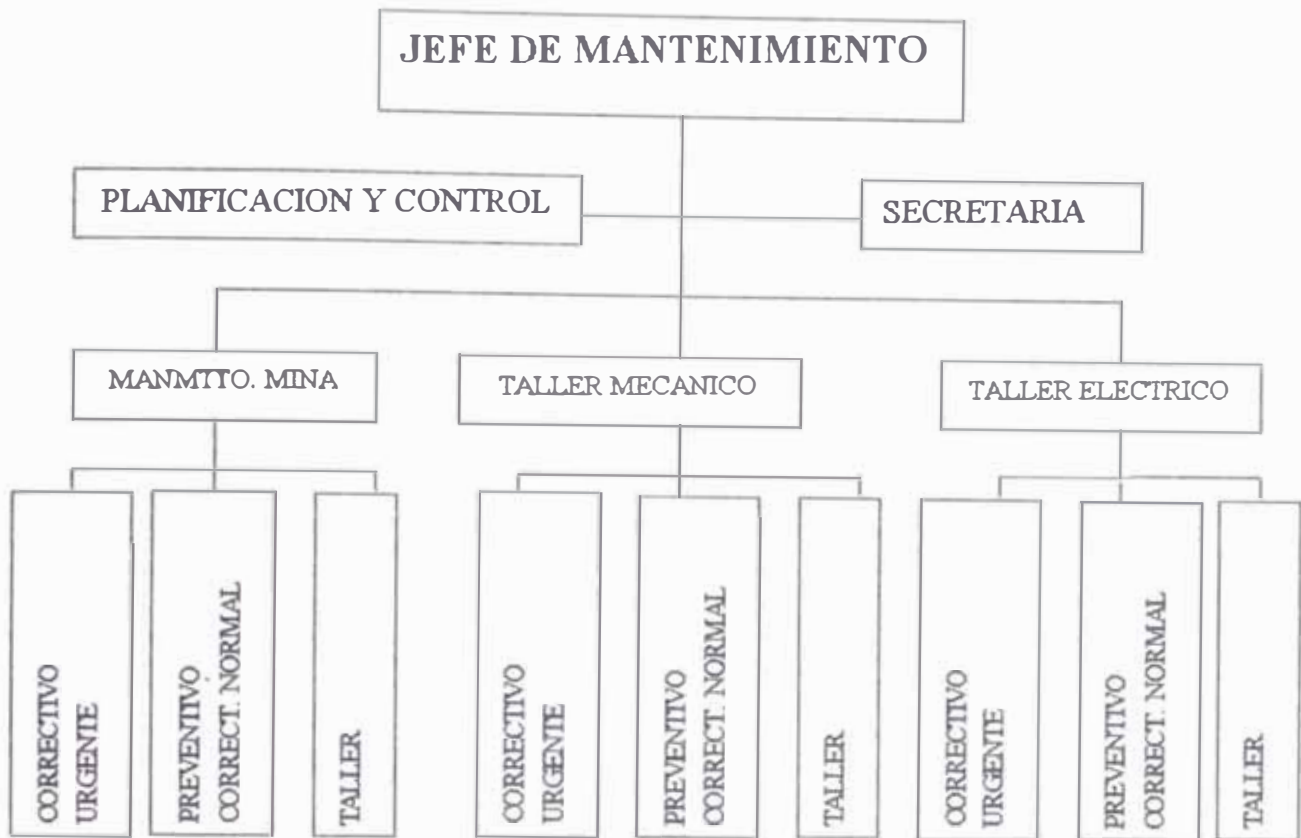


Figura. 2.20 Organigrama de mantenimiento centralizado

2.5.1 INDICES LIGADOS A LA PRODUCCIÓN.

2.5.1.1 Disponibilidad Mecánica (D.M.)

Al prolongarse la vida de una máquina, aumentan sus necesidades de mantenimiento, disminuyendo progresivamente su disponibilidad, afectando directamente a la producción. Más aún con las averías imprevistas cuya frecuencia aumenta con la edad de la máquina y que se deben al efecto combinado de los múltiples desajustes a que da lugar la fatiga mecánica de los materiales.

Todo ello ocasiona una pérdida a menudo irrecuperable de la producción, así como, de peligrosas coincidencias de máquinas averiadas que llegan a generar puntas de trabajo en mantenimiento y la imposibilidad de reparar en un plazo razonable, obligando en algunos casos a recurrir a contratos externos de mantenimiento para cumplir con las necesidades de maquinaria.

$$D. M. = \frac{H.P. - (M.P. + D.Mn.)}{H.P.} \times 100$$

Eficiencia de Operación (E.O.).- Representa el porcentaje de horas que ha trabajado el equipo con relación a las horas disponibles para operación (H.D.O.).

$$E. O. = \frac{H.T.}{H.D.O.} \times 100$$

Donde:

H.P. : Horas programadas para la operación.

M.P. : Horas de mantenimiento preventivo

D.Mn. : Demoras de mantenimiento.

H.T. : Horas trabajadas.

H.D.O. : Horas disponibles para la operación

2.5.1.2 Utilización (U)

Sintetiza el uso dado a las maquinaria en determinadas operaciones de una explotación minera. Evidentemente si “D” es mucho mayor que “U” sobra mantenimiento, y si “U” es próxima al 100% habrá que subir “D” cuando sea posible y compatible con la vida de la maquinaria.

$$U = \frac{\text{Horas de operación reales (HOR)}}{\text{Horas posibles de Operación (HPO)}} \times 100$$

2.5.1.3 Rendimiento (R)

Sintetiza el buen control del proceso productivo así como el estado de funcionamiento de la maquinaria y repercute en la producción y el mantenimiento

$$R = \frac{\text{Producción real / período}}{\text{Producción nominal / período}} \times 100$$

2.5.1.4. Aprovechamiento (A)

Relaciona los resultados de producción obtenidos frente a los presupuestados.

$$A = D \times U \times R \times 10^{-4}$$

2.5.2. Indices estructurales.

Se refieren fundamentalmente a los costos de mantenimiento en relación con la estructura de costos de la empresa.

2.5.2.1. Costos mantenimiento - producción. (CM-P)

Ayuda a ver el mantenimiento como un factor más del costo de producción, tiene una tendencia a incrementarse con la prolongación de la vida útil de la máquina.

$$CM-P = \frac{\text{Costo de mantenimiento}}{\text{Costos totales de producción}}$$

2.5.2.2. Costos de mantenimiento contratado. (CMC)

Expresa la política seguida por la empresa sobre los recursos humanos y la instrumentación especial para mantenimiento, acorde con la problemática laboral y los servicios existentes en la zona. Mejora el rendimiento en el servicio y da mayor flexibilidad.

$$CMC = \frac{\text{Costos de mantenimiento contratado}}{\text{Costos totales de mantenimiento}}$$

2.5.2.3. Costos de mantenimiento propio. (CMP)

El segundo se incrementa con la edad del equipo y el tiempo en servicio del mismo, mientras que el primero sufre poca variación al tener una programación periódica.

$$\text{CMP} = \frac{\text{Costos de mantenimiento preventivo}}{\text{Costos totales de mantenimiento}} \times 100$$

$$\text{CMP} = \frac{\text{Costos de mantenimiento correctivo}}{\text{Costos totales de mantenimiento}} \times 100$$

2.5.2.4 Recursos humanos. (R.H)

$$\text{R.H.} = \frac{\text{Plantilla de mantenimiento}}{\text{Plantilla total}} \times 100$$

Indica la política de conservación de sus equipos, que sigue la empresa, así como el grado de servicios contratados en mantenimiento. Este índice debe ser mayor en minería de superficie frente a minería de subsuelo, debido al tamaño de equipos con que se operan en cada método de explotación.

$$\frac{\text{Número de técnicos titulados en mantenimiento}}{\text{Plantilla total de mantenimiento}} \times 100$$

Con éste índice podemos intuir de alguna manera que los valores bajos pueden indicar una destecnificación excesiva y los valores más altos indican mucho mantenimiento contratado o excesiva estructura de mando en mantenimiento.

2.5.2.5 Rendimiento del recurso humano en mantenimiento.

$$\frac{\text{Horas-hombres previstas en mantenimiento}}{\text{Horas-hombres reales invertidas en su ejecución}} \times 100$$

En base a índices obtenidos en ejercicios pasados se puede realizar una planificación más realista, sobre las necesidades del personal en mantenimiento, para cumplir con el ejercicio del próximo año.

2.5.2.6. Trabajos de conservación efectuados por producción.

$$\frac{\text{Horas-hombre de producción trabajadas en conservación}}{\text{Horas-hombre totales de producción}} \times 100$$

Es muy importante que la producción también participe en la conservación del equipo, ya que influye en la vida de las máquinas, en su disponibilidad, en su utilización y en los costos de mantenimiento y operación.

CAPITULO III

REEMPLAZAMIENTO DE MAQUINARIA

3.1 INTRODUCCIÓN

El reemplazamiento de los equipos mineros se plantean como problemas de reemplazamiento y mantenimiento, ello puede considerarse como determinísticos o probabilísticos (estocásticos).

Los problemas determinísticos son aquellos en donde el tiempo y la consecuencia de la acción de reemplazamiento se asume en forma precisa; por ejemplo, podemos tener equipo en lo cual no está propenso a fallas, pero cuyo costo de operación aumenta con el uso. Para reducir este costo el equipo puede ser reemplazado, después del reemplazamiento los costos de operación se tiende a conocerse. Esta tendencia determinística en costos se ilustra en la figura 3.1

Los problemas probabilísticos son aquellos en donde el tiempo y la consecuencia de la acción de reemplazo depende de la ocasión o en forma casual (probable); en este caso el equipo es calificado como bueno o averiado (fallado). La ley de probabilidad que describe los cambios de bueno a fallado puede ser descrito por la distribución de tiempos entre la conclusión de la acción de reemplazo y averiado.

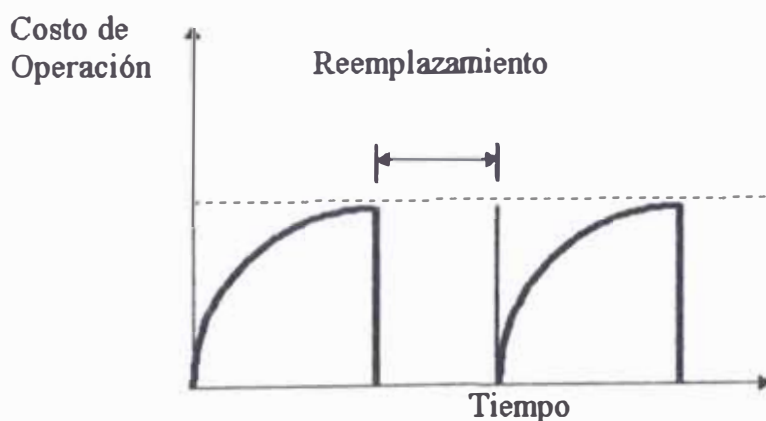


Figura. 3.1 Intervalo de reemplazo de equipos

La determinación en las decisiones de reemplazo para equipos con fallas probabilísticas incide en la toma de decisión bajo la modalidad de incertidumbre principalmente; es imposible entonces predecir con certeza cuándo ocurrirá la falla o más genéricamente cuando ocurrirá la transición desde un estado a otro en el equipo. Además a causa de la incertidumbre es imposible determinar el estado del equipo, como bueno, averiado o algunas veces entre ellas, a no ser que se conozca el mantenimiento en programa definido, así como la inspección.

En los problemas probabilísticos se asume sólo 2 posibles condiciones del equipo, **bueno y averiado** y la condición siempre es conocido.

Para determinar en qué momento se realiza el reemplazo, entonces estamos interesados en la secuencia de tiempos, para lo cual la acción del reemplazo tomará lugar cualquier secuencia de tiempo, dicha acción se considera como política de reemplazo, pero de lo que estamos interesados es determinar las políticas óptimas de reemplazo, esto es, uno de los cuales maximizar o minimizar al criterio, tales como beneficios, costo total, pérdida de tiempo, etc.

En muchos de los modelos de problemas de reemplazamiento se asume, sin exagerar, que la acción de reemplazo lo retorna al equipo en estado nuevo; para así que continúe con los mismos servicios del equipo reemplazado o mejor que ella. Por tomar este criterio estamos asumiendo varios costos del equipo, distribución de fallas, etc., usados en el análisis, son los mismos. La excepción de esta suposición serán los problemas donde la tecnología recientemente incorporadas a los equipos serán considerandos también en los modelos.

En casos donde se tenga vida ilimitada, mas o menos, y la tendencia de reemplazo sean idéntica, entonces el intervalo entre los reemplazos será constante. Este caso es conocido como política de reemplazo periódico.

3.2 MODELOS DE REEMPLAZAMIENTO

Existen varios modelos para evaluar el reemplazamiento de equipos, la mayoría de los cuales se basan en los costos que el equipo genera. Dentro de algunos modelos podemos mencionar: **Análisis de sensibilidad económica financiero** por la vía del riesgo, compuesto por el costo de propiedad y el costo de operación; **modelo del costo acumulado por horas**; **modelo de programación dinámica**, **modelo de aproximación estadística** basado en la maximización de beneficios o la minimización de costos; **modelos matemáticos basados en costos de reemplazamiento y de operación**, etc.

Antes de proceder con el desarrollo de modelos de reemplazo, es necesario evaluar las acciones de reemplazo preventivo, esto es, una acción tomada antes de que el equipo llegue al estado de falla, para lo cual se requiere analizar dos condiciones necesarias:

- a) El costo total del reemplazo es mucho mayor después de la falla, que el reemplazo se realice antes que ocurra la falla (sí el costo es considerado como el criterio apropiado; en otros casos el criterio apropiado se toma al tiempo). Esto causaría gran pérdida de producción, ya que el reemplazo después de la falla no se planifica; así mismo la falla de una de las piezas del equipo puede afectar al conjunto y su costo sería menor si se hubiera reemplazado la pieza antes de la falla.
- b) La tasa de fallas de equipo incrementa; cuando los equipos o algún equipo tiene fallas constante; esto es cuando las fallas ocurren de acuerdo a una distribución exponencial negativa. Cuando este es el caso, el reemplazo antes de la falla no afecta la probabilidad de que el equipo fallará próximamente, dado que el equipo se considera como bueno. Consecuentemente el dinero se desperdicia si el reemplazo preventivo es aplicado al equipo con fallas de acuerdo a la distribución exponencial negativa. Obviamente, cuando el equipo falla de acuerdo a la distribución hiper-exponencial su tasa de falla disminuye y otra vez el reemplazo preventivo no sería aplicado.

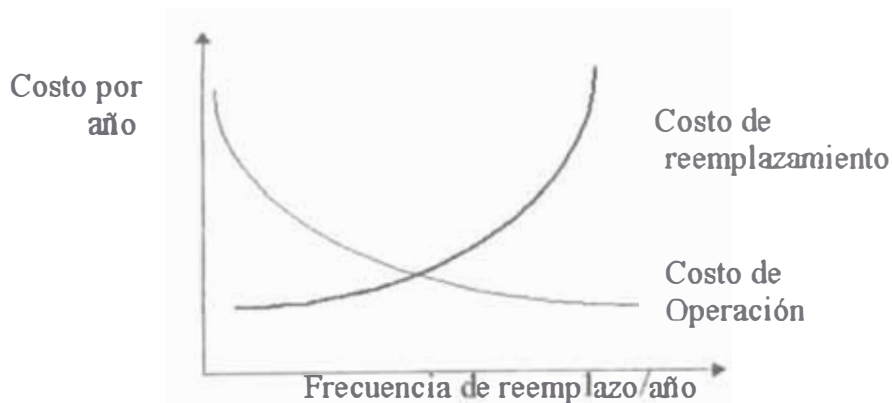
Se sabe que la tasa de fallas de equipos se incrementa antes de realizar el reemplazo preventivo. Cuando el equipo frecuentemente falla, la reacción del Ingeniero de mantenimiento debe ser, que el nivel de reemplazo preventivo se incremente.

3.3 TIEMPO ÓPTIMO DE REEMPLAZAMIENTO PARA EQUIPOS CUYOS COSTOS DE OPERACIÓN INCREMENTAN CON EL USO - METODO I

3.3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

De tiempo a tiempo, a decir anualmente o según el programa, se deben realizar evaluaciones para equipos que se tienen operando en la Empresa; Entre estas evaluaciones se detectan que el costo de operación del equipo aumenta debido al deterioro de ciertos componentes; algunas de estas partes deterioradas pueden ser reemplazados y así reducir el costo de operación. El costo de reemplazo en términos de materiales y jornales, es necesario realizar el balance entre el dinero invertido por el reemplazo y el de ahorro obtenido al reducir el costo de operación. Así se determinará una política óptima en la cual minimizará la suma de los costos de operación y reemplazamiento entre las evaluaciones periódicas o anual.

El análisis se ilustra en la figura 3.2.



3.3.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

1. $c(t)$ es el costo de operación por unidad de periodo en periodo t después del reemplazo
2. C_r es el costo de un reemplazamiento

3. La política de reemplazamiento es realizar "n" reemplazos igualmente espaciadas en Intervalos de t_r entre evaluaciones, esto es, en intervalos (O,T) como se ilustra en la figura 3.3.
4. El objetivo es determinar el intervalo óptimo entre reemplazamientos para minimizar la suma de costos de operación y reemplazamiento entre evaluaciones.

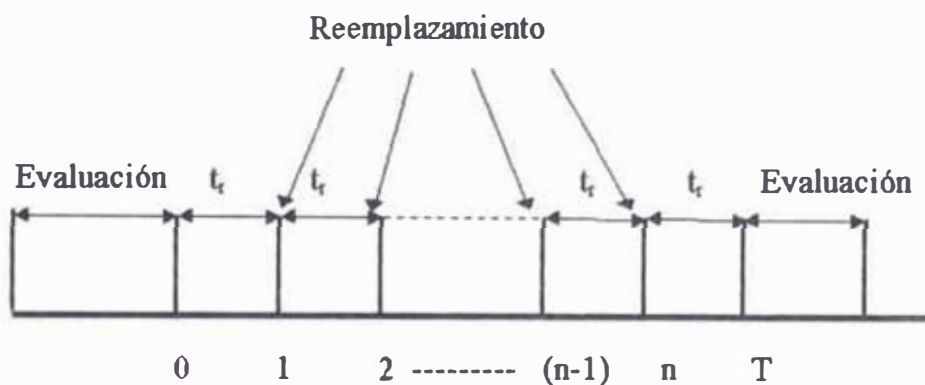


Fig. 3.3.

El costo total entre evaluaciones (inspecciones) será en función de los intervalos entre reemplazamientos, para lo cual el costo total se denotará por $C(t_r)$, luego obtendremos:

$C(t_r) = (\text{Costo de reemplazo} + \text{Costo de Operación})$ entre evaluaciones

- Costo de Reemplazo entre evaluaciones (inspecciones) es igual a número de reemplazos entre evaluaciones por el costo de reemplazo.

$$C(t_r) = nCr.$$

- Costo de Operación entre evaluaciones es igual a: Costo de operación por cada intervalo entre reemplazos por el número de intervalos entre evaluaciones.

$$C(t_r) = \int_0^{t_r} c(t) dt (n + 1)$$

Por lo tanto

$$C(t_r) = nCr + (n + 1) \int_0^{t_r} c(t) dt \dots\dots\dots 3.1$$

Sin embargo, n está en función de t_r , por lo cual n en términos de t_r será:

$$(n + 1)t_r = T ; \text{ donde } n = (T/t_r) - 1$$

Sustituyendo esta ecuación en (3.1) obtenemos:

$$C(t_r) = (TCr/t_r) - Cr + (T/t_r) \int_0^{t_r} c(t) dt \quad \dots\dots\dots 3.2$$

Este es un Modelo del problema relacionado entre intervalo de reemplazo t_r para un costo total $C(t_r)$.

3.3.3 EJEMPLO APLICATIVO

1. Las evaluaciones anuales realizadas de los equipos cuyos costos de operación por semana después de evaluar o reemplazar está dado por:

$$c(t) = A - B \exp(-kt)$$

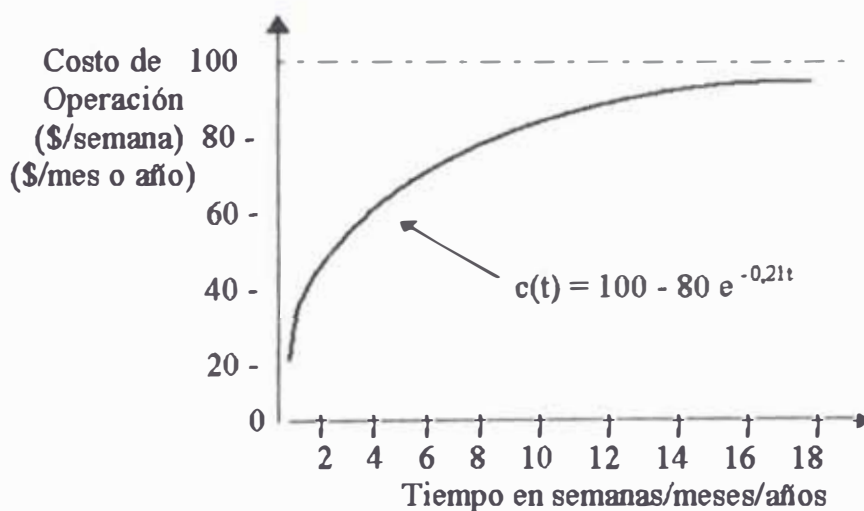


Figura 3.4 (a)

En este caso se han tomado valores para: $A = \$/ 100$; $B = \$/80$ y $k = 0,21$

Se pueden tomar otros valores según la conveniencia de cada empresa, se pueden ajustar los valores

(A - B) puede interpretarse como el costo de operación por unidad de tiempo si no ocurre la avería(deterioro). K es una constante que especifica la forma de la curva en la Figura 3.4(a).

2. Cr, es el costo de reemplazo (en este caso asumimos \$/100)
3. La forma del problema se ilustra en la figura 3.4 (b).
4. Luego de la sustitución de $A - B \exp(-kt)$ para $c(t)$ y integrando el modelo del problema (ecuación 3.2)se convierte en:

$$C(t_r) = \frac{TCr}{t_r} - Cr + TA + \frac{TB}{tk} \exp(-kt_r) - \frac{TB}{tk} \dots\dots\dots 3.3$$

Puesto que deseamos minimizar el costo total, entonces derivamos $C(t_r)$ con respecto a t_r y igualamos a cero:

$$\frac{d C(t_r)}{d t_r} = TCr(t_r)^{-1} - Cr + TA + \frac{TB}{k} e^{-kt_r} (t_r)^{-1} - \frac{TB}{k} (t_r)^{-1}$$

Derivando se tiene:

$$0 = \frac{TCr}{(t_r)^2} - \frac{TB e^{-kt_r}}{t_r} - \frac{TB e^{-kt_r}}{K(t_r)^2} + \frac{TB}{K(t_r)^2} \implies \frac{T}{t_r} \left(-\frac{Cr}{t_r} - B e^{-kt_r} - \frac{B}{Kt_r} e^{-kt_r} + \frac{B}{Kt_r} \right)$$

Puesto que T/tr no es cero, la expresión anterior viene a ser:

$$\left(-\frac{Cr}{t_r} - B e^{-kt_r} - \frac{B}{Kt_r} e^{-kt_r} + \frac{B}{Kt_r} \right) = 0$$

Factorizando y agrupando términos se tiene:

$$\frac{B}{k} - Cr = \left(Bt_r + \frac{B}{k} \right) e^{-kt_r} \dots\dots\dots (3.4)$$

Los valores de B , k y C_r deben ser conocidos, la variable desconocida en la ecuación 3.4 es " t_r ". El intervalo óptimo entre los reemplazos es por lo tanto el valor de t_r , la cual hace que ambos lados de la ecuación sean iguales.

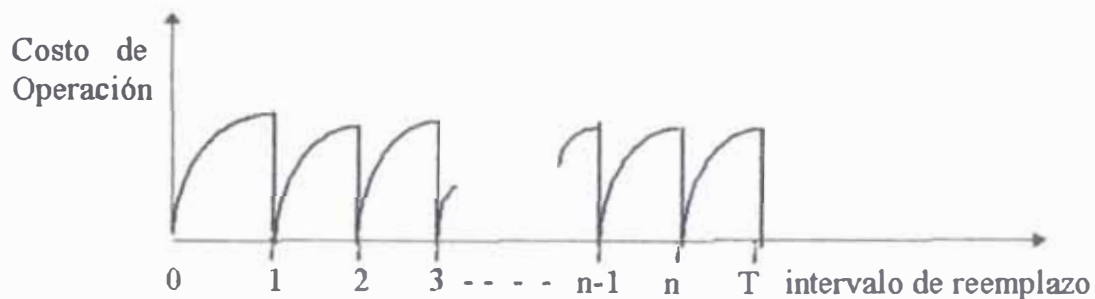


Figura 3.4 (b)

Solución del ejemplo Aplicativo con la ecuación 3.4.

Varios métodos numéricos pueden ser adoptados para resolver la ecuación 3.4, pero también se puede adoptar el ploteo gráfico; usando los datos del ejemplo, el método es:

- I. Evaluar el lado izquierdo de la ec. 3.4 y marcar este valor sobre el eje Y de la fig. 3.5.
- II. Evaluar el lado derecho de la ec. 3.4 para varios valores de t_r y plotear estos valores (ver fig. 3.5)
- III. Trazar una línea horizontal desde el valor del lado izquierdo hasta que intersecte la curva, entonces bajar en línea vertical al eje "X". El punto de intersección con el eje "X" con la vertical nos da el valor óptimo de " t_r ", en este caso es de 4.75 semanas; en otros casos pueden ser meses, años, etc.

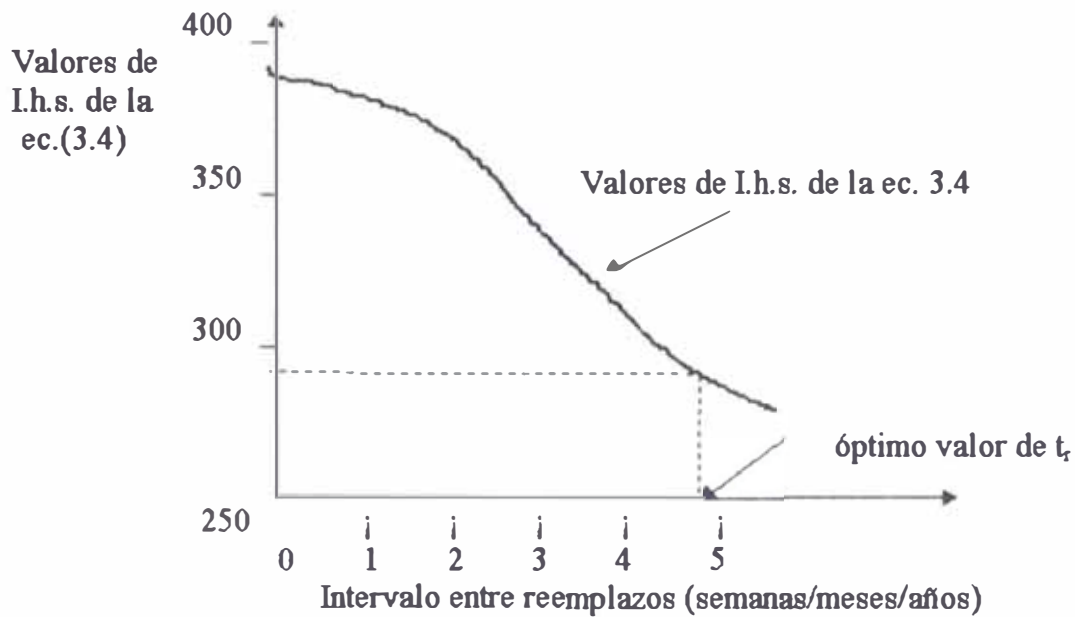


Figura 3.5.

Sustituyendo $t_r = 4.75$ semanas/meses/año, con los valores de A, B, Cr, T y k en la ecuación del costo total (3.3) obtenemos el costo total por año, para una política de reemplazo cada 4.75 semanas en nuestro caso, como:

$$\begin{aligned}
 C(4.75) &= \frac{52 \times 100}{4.75} - 100 + 52 \times 100 + \frac{52 \times 80}{4.75 \times 0.21} e^{(-0.21 \times 4.75)} - \frac{52 \times 80}{4.75 \times 0.21} \\
 &= \$/ 3562
 \end{aligned}$$

En la figura 3.6 se ilustra la tendencia de la curva del costo total de la ecuación (3.3) para varios intervalos de reemplazo. El efecto sobre el costo total de varias políticas de reemplazo pueden observarse claramente. Figura 3.6

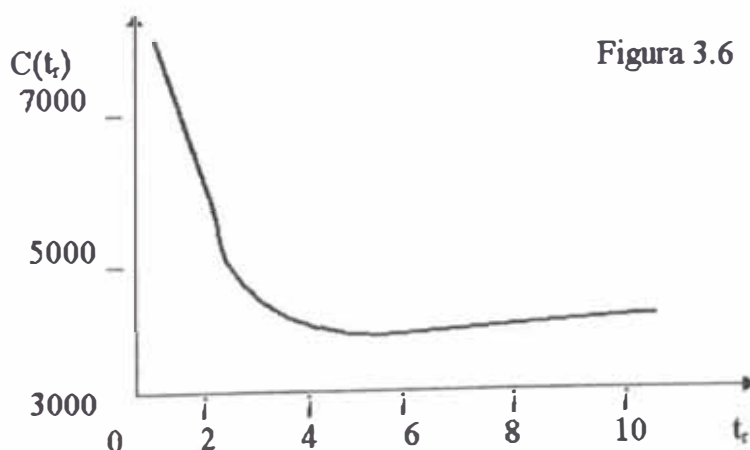


Figura 3.6

3.4 TIEMPO ÓPTIMO DE REEMPLAZAMIENTO PARA EQUIPOS CUYOS COSTOS DE OPERACIÓN INCREMENTAN CON EL USO - METODO II.

3.4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema es idéntico al caso descrito del Método I, excepto que el objetivo es **determinar** el intervalo de reemplazo que minimice el costo total por unidad de tiempo; más bien entre los dos puntos (0,T) como en el caso uno.

Cuando se trata de optimización del problema, en general deseamos optimizar algunas medidas de performance a lo largo del período de tiempo. En muchas situaciones este es equivalente para **optimizar** la medida de performance por unidad de tiempo, la cual matemáticamente es fácil para tratarlo. Primeramente **construyéremos** y resolveremos el modelo de este problema, la cual demostrará que en este caso los dos criterios son equivalentes.

3.4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

1. La tendencia del costo de operación " $C(t)$ " y el costo de reemplazo " C_r " están definidos en 3.3.2.
2. La política de reemplazo es realizar reemplazos a intervalos de longitud " t_r ". Se ilustra en la figura 3.7

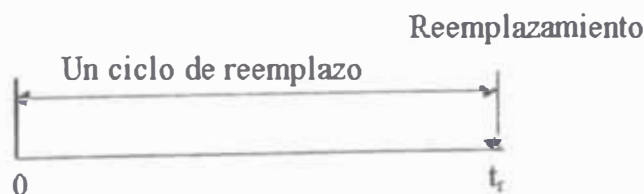


Figura 3.7

3. El objetivo es determinar el intervalo óptimo entre reemplazamientos para minimizar el costo total de operación y reemplazo por unidad de tiempo.

El costo total por unidad de tiempo $C(t_r)$, para reemplazamiento en el tiempo t_r es:

$$C(t_r) = \frac{\text{Costo total en el intervalo } (0, t_r)}{\text{Longitud del intervalo}}$$

Costo total en el intervalo = Costo de Operación + Costo de reemplazamiento

$$= \int_0^{t_r} c(t) dt + Cr$$

$$C(t_r) = \frac{1}{t_r} [\int_0^{t_r} c(t) dt + Cr] \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

Este es un modelo del problema relacionando el intervalo de reemplazamiento t_r con el costo total $C(t_r)$ por unidad de tiempo.

3.4.3 EJEMPLO APLICATIVO

Usando los datos del ejemplo 3.3.3 Tenemos:

$$C(t_r) = \frac{1}{t_r} [\int_0^{t_r} (100 - 80 e^{-0.21t}) dt + 100]$$

La evaluación del modelo, para diferentes valores de t_r se muestra en la tabla 3.1. En la cual nos indica el valor óptimo de t_r es de 5 semanas; que es la misma solución del ejemplo 3.3.3 Caso I. Si 4.75 es redondeado al entero más próximo.

Tabla 3.1

t_r	1	2	3	4	5	6	7
$C(t_r)$	127.8	84.7	74.0	70.9	70.5	71.5	72.5

3.4.4 COMENTARIOS ADICIONALES

En la construcción de los modelos del segundo y del primer método, el tiempo requerido para hacer un reemplazo no ha sido incluido. Este tiempo puede ser asumido sin ninguna dificultad, como se observa en la figura 3.8 y la ecuación 3.6 la cual es un modelo apropiado.

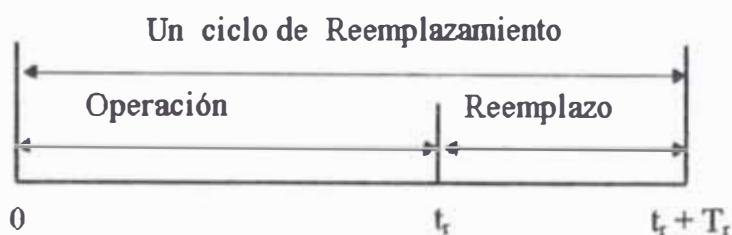


Figura 3.8

$$C(tr) = \frac{\int_0^{tr} c(t) dt + Cr}{tr + Tr} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

3.5 MODELO DE REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPO POR EL METODO DEL COSTO ACUMULATIVO POR HORAS

3.5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La inversión promedio de un equipo por unidad de tiempo tiende a disminuir con el uso; mientras los costos de operación y mantenimiento se incrementan con el uso. Los costos de operación y de mantenimiento son los factores determinantes para realizar el reemplazo del equipo empleado.

El bajo índice de confiabilidad a causa del tiempo de servicio o del desgaste, conduce al equipo al deterioro físico y económico, lo cual conduce a reemplazar el equipo por la intensidad de trabajo que desarrolla.

3.5.2 MÉTODO DEL COSTO ACUMULATIVO POR HORAS

Es un modelo matemático que emplea funciones continuas (funciones de costos crecientes y decrecientes). El costo total de esta ecuación es optimizar, derivando la ecuación con respecto a la variable de decisión; con este valor se puede encontrar el valor de la variable que minimice el costo total promedio. La ecuación que se emplea es:

$$Y = f(x)$$

En el sistema cartesiano

Donde:

Y = Costo promedio por hora trabajada en US\$

X = Horas acumuladas de trabajo

3.5.3 PROCEDIMIENTO DE LOS CÁLCULOS

- I. Se determinan ecuaciones continuas que representan a los costos horarios promedios de inversión, operación y mantenimiento en función a las horas acumuladas de trabajo y basándose en las informaciones estadísticas calculadas.
- II. El costo horario de inversión (Y) se obtiene relacionando el costo de adquisición (I) y las horas trabajadas del equipo (X); el resultado es una curva, en donde se puede apreciarse que el costo de inversión horaria promedio es inversamente proporcional a las horas trabajadas; la ecuación entonces es representada como:

$$Y = I/X$$

- III. Los costos horarios de operación y de mantenimiento promedio de los equipos, es representado por una función lineal. La base de datos representados en cuadros respectivos son determinados mediante la ecuación de regresión lineal simple de la forma:

$$Y = a + bX$$

Donde:

Y = Costo horario promedio de operación o mantenimiento

X = Horas trabajadas promedio acumuladas

Las ecuaciones para estimar los parámetros a y b son:

$$b = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = y' - bx'$$

Donde x' e y' son las medias aritméticas de x e y respectivamente.

El grado de correlación (r) se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$r^2 = \frac{[n\sum xy - (\sum x)(\sum y)]^2}{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}$$

Por último se suma los tres costos obtenidos con las ecuaciones respectivos, el resultado es una ecuación del costo total.

Para obtener el punto de reemplazo se realiza la derivada de Y (costo horario) con respecto a X (horas de trabajo), donde $dy/dx = 0$; el resultado viene a ser el valor mínimo del costo horario total.

En la gráfica respectiva de las ecuaciones el costo total genera una curva en el sistema cartesiano, en el eje "X" llegará a un punto bajo y a partir de ésta, la curva empezará a subir. Entonces indica que los costos horarios aumentan en función a las horas acumuladas de trabajo, por lo tanto el punto óptimo de reemplazo será aquel valor donde la suma de los costos sea el menor, es decir el punto más bajo de la curva.

3.6 MODELO DE REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPO POR EL METODO DE INDICES DE RENTABILIDAD ECONOMICA

3.6.1 CONSIDERACIONES GENERALES

El modelo de reemplazo se basa en emplear el costo de propiedad o adquisición, valor residual y el costo de operación y mantenimiento. Una vez obtenido los costos y rendimientos se ajustan los valores, por el método de regresión lineal, el resultado será una curva para el periodo en estudio.

Sumando los costos de propiedad y operación de los equipos en estudio se determina el costo total horario mínimo de producción, desde donde se plantea su reemplazo. Una vez determinado el punto teórico óptimo para la reposición del equipo se consideran los índices de rentabilidad económico y financiero como es el VAN y la TIR .

3.6.2 ESTIMACIÓN DEL VALOR RESIDUAL DE UN EQUIPO

En la práctica, es difícil determinar el valor residual real y exacto de un equipo en operación, una idea aproximado nos da el mercado de segunda mano, en donde el valor de un equipo es tanto menor cuanto más antiguo sea y cuantas más horas haya trabajado. Así, las dos variables fundamentales de que depende el valor residual (V_r) es:

- El número de años de servicio (n).
- El número de horas totales trabajadas (H).

Entonces el valor residual se expresa como:

$$V_r = f(n, H); \quad V_r = K \cdot a^n \cdot B^H$$

En donde a y B son constantes que se pueden estimar mediante un ajuste por mínimos cuadrados a partir de una estadística de precios en el mercado de segunda mano. El valor K debería ser igual o muy aproximado al valor inicial o precio de adquisición del equipo nuevo (V_0). Por lo tanto se asume que un equipo nuevo vale: $V_r = V_0$, (para $n = 0$ y $H = 0$). Sustituyendo a la ecuación anterior se tiene:

$$V_r = K \cdot a^0 \cdot B^0 = K = V_0$$

Si un equipo trabaja un número normal de horas asignadas al año (h) y siendo estas constante, se puede afirmar que $H = h.n$; lo que simplifica el ajuste estadístico y sustituyendo se tiene:

$$V_r = K \cdot a^n \cdot B^{hn} = K (a.B^h)^n$$

Donde : $b = K.b^n$; resulta:

$$V_r = K \cdot b^n$$

Un equipo en la minería superficial, normalmente durante el primer año pierde entre el 20 y el 25% de su valor inicial. Por lo tanto, se puede determinar el valor de (b) para una función exponencial, mediante logaritmo del mismo. Si obtenemos el promedio de la pérdida del primer año de 22%, el valor residual al inicio del segundo año será del 78% de su precio, entonces se tiene:

$$\text{Log } b = \text{Log } 0,78 = -0.2485$$

$$b = e^{-0.25}$$

$$V_r = K (e^{-0.25})^n$$

La ecuación obtenida nos permite determinar el valor residual de un equipo en operación a cielo abierto en función de la edad del equipo expresado en números de años de servicio y horas de trabajo neto acumulado.

3.6.3 FINANCIACIÓN, AMORTIZACIÓN E INTERESES

Conceptualmente, la amortización financiera es independiente de la amortización técnica de inmovilizados. No obstante, por razones de equilibrio financiero conviene que existe un cierto paralelismo entre la vida de los préstamos y la de los inmovilizados financieros con dichos préstamos. En la devolución de la cantidad de dinero prestado para la adquisición de equipos se considera en nuestro caso el método de amortización de las anualidades constantes; por lo tanto se tiene:

$$a = C \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Donde:

a = Anualidad por el método de la amortización constante.

C = Capital préstamo.

n = Plazo de amortización o vida del préstamo.

i = tasa de interés anual

Por este método los pagos del deudor al final de cada periodo de tiempo o año, tanto en concepto de interés como de reembolso (amortización del principal) son iguales para todo los periodos.

3.6.4 COSTO DE PROPIEDAD DE UN EQUIPO

El costo horario anual medio de propiedad (CPR), está en función directa al precio de adquisición de un equipo nuevo (V_0), más el costo financiero del capital generado por los intereses (I) a una tasa anual (i), menos el valor residual del equipo después de n años de servicio.

Si $A = V_0 + I$, donde A es un capital asignado para cubrir la compra del equipo nuevo y sus costos financieros, tenemos: $CPR = A - V_r$.

Reemplazando $V_r = K e^{-0.25(n)}$ y haciendo $A = K$, obtenemos la siguiente expresión:

$$CPR = \frac{A \cdot i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} - \frac{A \cdot i \cdot e^{-0.25(n)}}{(1+i)^n - 1} = \frac{A [i(1+i)^n - i \cdot e^{-0.25(n)}]}{(1+i)^n - 1}$$

Para calcular el costo de propiedad horario dividimos la expresión anterior, entre el total de horas posibles (TTP) a trabajar con el equipo durante un año y resulta:

$$CPR = \frac{A [i(1+i)^n - i \cdot e^{-0.25(n)}]}{TTP[(1+i)^n - 1]}$$

3.6.5 COSTO DE OPERACIÓN DE UN EQUIPO

Para determinar el costo horario anual promedio de operación (COP) se deben de recurrir a los archivos históricos de los equipos que están operando, en nuestro caso de los equipos que se quiere reemplazar.

Los costos obtenidos se deben de agruparse de la siguiente manera:

- Costo de mantenimiento (CMA) sumando los del mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo, incluyendo los trabajos considerados como mantenimiento predictivo.
- Costo por desgaste o destrucción, para el caso de volquetes será de los neumáticos (CNE).
- Costo de energía (CEN), consumo de gas-oil
- Costo de mano de obra o personal (CMO).
- Costo de materiales varios (CMV).
- Costo por servicios auxiliares prestados (CSE).

Por lo tanto el costo de operación (COP) será la suma de todas las partidas mencionadas, en cada uno de los años de servicio del equipo; estos valores deben ser divididos por la disponibilidad (D), la ecuación que representa es:

$$COP = \frac{1}{D} \sum [CMA_n + CNE_n + CEN_n + CMO_n + CMV_n + CSE_n]$$

Cuando los datos obtenidos son muy aleatorias, se pueden ajustar a una función rectilínea mediante un programa de *análisis de regresión lineal* para cada partida, luego se suman y se obtiene la ecuación de la función del costo total de operación (COP) de los equipos de un periodo de “t” años después de su adquisición, con sus correspondientes valores de las desviaciones típicas, coeficiente de correlación. La ecuación del costo de operación resultante de análisis de regresión lineal se integra según la variable tiempo en función del número de años (n) de servicio u operación del equipo.

3.6.6 ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÓPTIMA DE UN EQUIPO

Al comenzar un año (n) cualquiera, es interesante preguntarnos si será rentable o no mantener en funcionamiento parte o toda la flota de equipos durante dicho año. Esta cuestión sólo puede contestarse adecuadamente con un modelo de cálculo, en el cual intervenga de modo comparativo, la rentabilidad de un equipo nuevo respecto del que está en uso; naturalmente dependerá de las características y el precio del equipo nuevo, además del costo de mantenimiento y el valor residual del equipo en uso.

El tiempo necesario y óptimo hasta donde utilizar el equipo, está dado por el costo horario anual medio de producción (CMP), que está compuesto por el costo de propiedad (CPR) y el costo de operación (COP). Por lo tanto se tiene:

$$CMP = CPR + COP$$

$$CMP = \frac{A [i (1 + i)^n - i.e^{-0.25(n)}]}{TIP[(1 + i)^n - 1]} + \frac{1}{n} \int_0^n f(x) dx$$

Donde $f(x)$ es el costo de operación t años después de su adquisición

El costo de propiedad va decreciendo con los años de servicio del equipo, debido a la depreciación que éste experimenta por el desgaste físico u obsolescencia, lo que puede inducir a prolongar indefinidamente la vida del equipo. Mientras que el costo de operación se incrementa con la edad del equipo, debido principalmente al costo de mantenimiento y reparación, unido a ello la pérdida de disponibilidad y rendimiento por el aumento de las horas de parada. Si el costo de operación es muy elevada va a propiciar el reemplazo adelantado del equipo.

La vida óptima de utilización de un equipo se obtiene graficando las curvas de costos, compuesto por los costos de operación y propiedad para diferentes años de vida, en función al tiempo de servicio en años del equipo en estudio.

3.6.7 ESTUDIO DE LA RENTABILIDAD ECONÓMICA EN UN PROCESO DE REEMPLAZAMIENTO

Para aplicar indicadores de rentabilidad económica al estudio de reposición del equipo, hay que pensar en dos posibles alternativas principales que llevarían a determinar la vida óptima de utilización del equipo. La primera pensando en la maximización de beneficios y la segunda mediante la mininización de costos, también puede plantearse como una combinación de ambas u otras derivadas de ellas.

3.6.7.1 Reposición de equipos mediante el criterio del VAN con maximización de beneficios

El análisis se basa en aplicar el criterio del VAN a la maximización de la diferencia de los costos de operación respecto al primer año, considerando a las diferencias de operación como beneficios generados si no se hubiera incurrido en el incremento del costo de operación. Como los costos fijos que componen el costo de propiedad del equipo se mantienen casi constantes trabaje o no el equipo, solo se realiza el estudio del costo de operación por sufrir incrementos durante la vida del equipo.

A partir de las diferencias de los costos de operación, se determinan varios flujos del margen de operación ($C_n - C_0$) hasta llegar a $(n - 1)$ años de vida del equipo. Luego se asume el valor de inmovilizado (C_m) para cada año (n) de vida del equipo y se calcula el VAN reemplazando datos en la expresión siguiente:

$$\text{VAN} = \frac{C_1 - C_0}{(1 + i)} + \frac{C_2 - C_0}{(1 + i)^2} + \dots + \frac{C_n - C_0}{(1 + i)^n} - C_m$$

Donde:

- C_0 – Costo de operación en el primer año de servicio.
- C_n – Costo de operación en el año n de vida del equipo
- C_m – Inmovilizado de capital al margen de operación.
- i – Tasa de actualización.
- n – Número de años en servicio del equipo

Cuando el VAN presente el mayor valor sería un indicador más sobre la vida del equipo y el momento en el que el equipo produce con un costo mínimo, permitiendo en ese momento plantear el posible reemplazo, donde la ventaja económica sea mayor.

3.6.7.2 Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) sobre el margen del costo de operación en reemplazo de equipos

A partir de los datos de los VAN para los distintos flujos calculados se mide la rentabilidad, interpolando valores del VAN menor y del VAN mayor. Empleando la siguiente expresión:

$$TIR = [Ti + (Tm - Ti) \frac{Vi}{Vi - Vm}] 100$$

Donde:

TIR	Tasa interna de retorno
Ti	Tasa inferior de actualización
Tm	Tasa mayor de actualización
Vi	Valor actualizado de la tasa de actualización inferior
Vm	Valor actualizado de la tasa de actualización mayor

La tasa de retorno interna así obtenida solo es aparente y no se puede tomar como un parámetro que mida con exactitud el grado de rentabilidad. Para ello es necesario corregirla a efectos de inflación o deflación.

La tasa interna aparente es generalmente mayor que la tasa de retorno corregida y ésta última se calcula mediante la expresión siguiente:

$$r = \frac{TIR - \Omega}{1 + \Omega}$$

Donde:

r	Tasa interna de retorno real o corregida
	Tasa de devaluación por inflación

CAPITULO IV

APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE REEMPLAZO DE EQUIPOS

4.1 GENERALIDADES

La aplicación de los modelos de mantenimiento y reemplazamiento descritos en el trabajo de investigación (capítulo III) es realizado en la mina CERRO VERDE S.A.. Los yacimientos de Cerro Verde y Santa Rosa se encuentran ubicados geográficamente en el distrito de Uchumayo, Provincia de Arequipa, Departamento de Arequipa; sus coordenadas geográficas se localizan entre 71°34' de longitud Oeste y 16°33' de latitud Sur, con elevaciones que fluctúan entre 2,200 y los 2,9000 m.s.n.m.

4.2 CARACTERISTICAS GENERALES DEL YACIMIENTO

Las actividades mineras realizadas en Cerro Verde datan desde el año 1868; en 1971 las concesiones de Cerro Verde y Santa Rosa revierten al estado, con un área de 1,200 Has y son asignados a Minero Perú, iniciándose en 1977 la etapa de producción.

Actualmente es propiedad de Cyprus Climax Metals Company a través de su subsidiaria Sociedad Minera Cerro Verde S.A. Cyprus adquirió en propiedad estos depósitos a fines de 1993 y tomó posición de la misma en marzo de 1994, iniciando un programa agresivo de exploración, que trajo como consigo la perforación de 40 Km de taladros diamantinos en Cerro Verde y Santa Rosa.

La mineralización y alteración de los depósitos de Cerro Verde y Santa Rosa, es típica de los depósitos de cobre porfirítico, con una distribución zonal concéntrica de zonas de alteración y con zonas subhorizontales de mineralización supérgena. en las evaluaciones de reserva se ha estimado en 171 millones de toneladas de mineral lixiviable con una ley de 0.77 % de Cu total y 179 millones de mineral primario para molienda con leyes de 0.71% de Cu total.

4.3 SITUACION OPERACIONAL

Las operaciones de minado a cielo abierto de los depósitos de Cerro Verde y Santa Rosa, consiste con bancos de 15 metros con una berna de 35 metros. El ancho mínimo de la rampa para el transporte es de 25 m, con gradientes en promedio de 8% para los volquetes, el ángulo de talud de banco varía entre 68 a 90°, el ángulo del talud de trabajo es de 37°, con un ángulo de talud final de 45° en promedio, dependiendo de la dureza y características geomecánicas de la roca.

La producción anual de la mina asciende a 6 millones de toneladas por año aproximadamente en promedio entre mineral, mineral Leach y desmonte. La ley de corte es de 0.39% Cu, con una ley de cabeza en promedio de 0.68% Cu, con una relación de Striping de 1.66 TM de estéril por 1 TM de mineral en promedio.

4.3.1 Equipos empleados de carguío y transporte

Las operaciones unitarias de carguío y transporte motivo del presente trabajo de investigación, se iniciaron dentro de Minero Perú con los siguientes equipos:

Equipo de Carguío:

- 4 Palas Eléctricas P&H, modelo 1990-AL de 11 Yd³.
- 1 Cargador frontal Le Torneau L-700
- 1 Cargador frontal Cat- 988

Equipo de transporte:

- 6 Volquetes Lectra Haul M-100 de 100 T.C.
- 10 Volquetes Lectra Haul M-85 de 85 T.C.
- 15 Volquetes Wabco 35 D de 35 T.C.

4.3.2 Equipos empleados de carguío y transporte en la actualidad

Los equipos de carguío y transporte con que cuenta en la actualidad la unidad Minera Cerro Verde son como sigue:

Equipos de Carguío:

- 3 Pala eléctrica P&H 1900 de 11 Yd³ de capacidad
- 1 Pala Eléctrica 2800 XPB de 44 Yd³ de capacidad
- 1 Cargador frontal CAT-992C de 13 Yd³ de capacidad
- 1 Cargador frontal CAT-992D de 23 Yd³ de capacidad.

Equipo de transporte:

- 5 Volquetes CAT- 789B de 98,33 m³ de capacidad (177 Ton)
- 3 Volquetes CAT-777C de 45,56 m³ de capacidad (82 Ton)

4.4 ESPECIFICACIONES TECNICAS Y EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS EN ESTUDIO

Para la aplicación de los modelos es necesario contar con especificaciones técnicas y datos estadísticos de operación de los equipos, en este caso de los equipos de carguío y transporte. El estudio de reemplazo se realiza con las palas eléctricas P&H 1900-AL y volquetes Lectra Haul M-100. Dichos equipos han operado desde su adquisición en 1974 y 1975 hasta que el nuevo propietario Cyprus Climax dio por baja a los volquetes y aún se sigue usándose tres palas P&H 1990-AL de propiedad Minero para el carguío.

4.4.1 ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS EQUIPOS

PALA ELECTRICA P&H 1900-AL

Capacidad del cucharón	: 8.41 m ³ (11 Yd ³)
Peso total aproximado	: 400 ton.
Altura máxima del piso a la polea de la pluma	: 13.10 m.
Longitud de la pluma	: 12.19 m.
Longitud del lápiz	: 8.22 m.
Altura máxima de descarga con compuesta abierta	: 8.22 m.
Radio máxima de descarga	: 16.22 m.
Angulo de pluma	: 45°
Velocidad máx. de traslado	: 1.5 Km/h.
Altura máxima de corte	: 12.95 m.
Radio máxima de corte	: 17.62 m.
Potencia eléctrica	: 4,160.0 Voltios.

VOLQUETE LECTRA HAUL M-100

Potencia en HP	: 1,000 HP
Motor principal	: Detroit diesel Allison
Propulsión	: Eléctrico
Capacidad	: 100 ton. (59.55 m ³)
Peso vacío	: 143,000.00 Lbs.
Rango de velocidad	: 0 – 42 KPH.
Longitud	: 59.93 m.
Ancho	: 5.23 m.
Altura con tolva abajo	: 5.21 m.
Altura con tolva levantada	: 9.00 m.

Velocidad mínima del motor	: 650 RPM.
Velocidad máxima del motor	: 2,300 RPM.
Presión del aceite	: 50 – 70 PSI.

4.4.2 COMPONENTES DE LOS EQUIPOS DE CARGUIO Y TRANSPORTE

En los cuadros 4.1 y 4.2 se describen los componentes principales de los equipos en estudio, y su vida estándar según los catálogos de los fabricantes.

Cuadro No. 4.1

COMPONENTES DE LA PALA ELECTRICA P&H 1900-AL

Cod	DESCRIPCION	Vida Estándar hrs.
A	Motor principal	24000
B	Generador de propulsión/empuje	15000
C	Generador de giro	15000
D	Motor de propulsión	36000
E	Motor de empuje	12000
F	Motor de giro derecho	15000
G	Motor de giro izquierdo	15000
H	Ventilador de cabina derecha	24000
I	Ventilador de cabina izquierda	24000
J	Motor de compresora auxiliar	18000
K	Motor de compuerta	5000
L	Mandos finales	10000
M	Sprockets	2000
N	Rodillos inferiores	4000
O	Zapatas	2000
P	Transmisión de empuje	12000
Q	Magnetorque	3000
R	Cuchara	3000
S	Lápiz	3000
T	Transmisión de giro izquierdo y derecho	12000
U	Pluma	12000
V	Tambor de izar	12000
W	Caja de engranajes de izar	12000
X	Caja de cadena	12000
Y	Eje de giro izquierdo	6000
Z	Eje de giro derecho	6000
AA	Compresora auxiliar	12000

Fuente: Datos estadísticos taller de equipo pesado y almacén Mina C^o verde

Cuadro No. 4.2

COMPONENTES DEL VOLQUETE LECTRA HAUL M-100

Cod	DESCRIPCION	Vida Estándar hrs.
A	Motor diesel	12000
B	Inyector, coj., propulsión eje de levas	6000
C	Turbo izquierdo delantero	12000
D	Turbo izquierdo posterior	12000
E	Turbo derecho delantero	12000
F	Turbo derecho posterior	12000
G	Radiador	6000
H	Arrancador neumático	3600
I	Compresor	12000
J	Blower de ventilador	12000
K	Rueda motorizada derecha	12000
L	Rueda motorizada izquierda	12000
M	Cilindro de izar izquierdo	12000
N	Cilindro de izar derecho	12000
O	Suspensión delantera derecha	24000
P	Suspensión delantera izquierda	24000
Q	Suspensión posterior derecha	24000
R	Suspensión posterior izquierda	24000
S	Cojinete de rueda delantera izquierdo	6000
T	Cojinete de rueda delantera derecho	6000
U	Frenos delanteros	6000
V	Frenos posteriores	6000
W	Tolva	6000
X	Chasis	6000
Y	Bomba hidráulica en tandem	12000
Z	Generador principal	15000
AA	Armadura de rueda derecha	6000
AB	Armadura de rueda izquierda	6000
AC	Excitador	15000
AD	Motor ventilador del dínamo	40000

Fuente: Datos estadísticos taller de equipo pesado y almacén Mina Cº verde

4.4.3 CAUSAS DE DESGASTE DE LOS EQUIPOS DE CARGA Y TRANSPORTE

Los factores y las causas de desgaste de los componentes de los equipos de carga y transporte en la Mina Cerro Verde se especifican en los cuadros 4.3 y 4.4.

Cuadro No. 4.3

RESUMEN DE FACTORES DE DESGASTE O FALLAS – PALAS P&H 1900-AL

COMPONENTE	FACTORES PRINCIPALES DE DESGASTE Y FALLAS
Cucharón	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de material (desbroce, mineral), material lixiviado (recarguío), con presencia de ácido sulfúrico (corrosión/erosión). Calidad del disparo (tamaño del mineral disparado). Calidad del acero de las puntas y cucharón o de sus refuerzos.
Lápiz y sistema de empuje	<ul style="list-style-type: none"> Baja frecuencia de engrase. Mala calidad de la grasa (muy densa: taponamientos; muy liviana no se adhiere). Montaje (negligencia en no respetar las luces y tolerancias que indica el catálogo). Errores de operación por sobrecarga, frente muy duro (malos disparos).
Sistema de traslación zapatas de orugas, mandos finales, rodillos.	<ul style="list-style-type: none"> Tensado de orugas; cuando está floja se pierde el paso, aumentando el rozamiento. Traslados largos; desgaste prematuro de zapatas y sprokets. Lubricación de rodillos deficiente. Reemplazo tardío de bocinas y bujes de bronce (desgaste de metal base).
Sistema de izaje: Magnetorque, tambor del hoist, cajas de reducción, cables de izar.	<ul style="list-style-type: none"> Lubricación deficiente (fallas en bombas o filtros, bajos niveles de lubricación en los depósitos). Mala calidad del lubricante. Fuga de lubricantes por empaquetaduras o fisuras. Fatiga de componentes por horas acumuladas de trabajo. Mala operación; maniobra brusca al izar el cucharón (rotura del cable).
Sistema de giro – caja de reducción tornamesa.	<ul style="list-style-type: none"> Lubricación deficiente. Calidad del lubricante Fatiga de los componentes por horas acumuladas. Mala operación.

Fuente: Estadística maestranza y Dpto. de equipo pesado Cº verde.

Cuadro No. 4.4

RESUMEN DE FACTORES DE DESGASTE O FALLAS – VOLQUETES M-100

COMPONENTE	FACTORES PRINCIPALES DE DESGASTE Y FALLAS
Motor Diesel	<ul style="list-style-type: none"> Deficiencia en el sistema de lubricación Desgaste de cilindros, pistones y anillos Desgaste de metales de bancadas
Radiador	<ul style="list-style-type: none"> Calichamiento, que se produce por incrustaciones de alcalinos en las paredes del panel. Fuga de agua por resecamiento de empaquetaduras. Fatiga en las soldaduras de estaño, formándose grietas.
Suspensiones	<ul style="list-style-type: none"> Endurecimiento de gomas Fatiga de los muñones (rodamientos malogrados) Por accidente (mala maniobra)
Cilindro de izar	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste de los sellos y bocinas internas (por fuga de aceite hidrolina). Desgaste de cojinete de montaje.
Frenos posterior.	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste de pastillas y discos
Arrancador neumático	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste del pistón de ataque.
Tolva	<ul style="list-style-type: none"> Rajadura y desgaste de las plancha laterales y base
Rueda motorizada	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste de rodamiento del inducido.

Fuente: Estadística maestranza y Dpto. de equipo pesado Cº verde.

4.4.4 VIDA EXPECTATIVA DE LOS EQUIPOS

La Expectativa de vida de los componentes de los equipos en estudio, se ha conceptualizado como la vida útil máxima que pueda tener un componente, desde que ha entrado en operación hasta su última reparación. El número de reparaciones se ha estimado en base a datos estadísticos del departamento de mantenimiento. Estos datos se observan en los cuadros 4.5 y 4.6.

Cuadro No. 4.5

Vida reajustada y expectativa en horas de los componentes de Pala P&H 1900-AL

Cod	DESCRIPCION	V.E. reajustado	No. De reparación	Expectativa de vida
A	Motor principal	27000	4	81000
B	Generador de propulsión/empuje	12000	8	72000
C	Generador de giro	15000	6	67500
D	Motor de propulsión	40000	3	100000
E	Motor de empuje	12000	6	54000
F	Motor de giro derecho	15000	6	67500
G	Motor de giro izquierdo	15000	6	67500
H	Ventilador de cabina derecha	20000	8	120000
I	Ventilador de cabina izquierda	20000	8	120000
J	Motor de compresora auxiliar	20000	4	60000
K	Motor de compuerta	14000	4	42000
L	Mandos finales	12000	4	36000
M	Sprockets	3800	4	11400
N	Rodillos inferiores	4000	4	12000
O	Zapatillas	3000	4	9000
P	Transmisión de empuje	13000	4	39000
Q	Magnetorque	4000	6	16000
R	Cuchara	6000	10	45000
S	Lápiz	3000	10	22500
T	Transmisión de giro izquierdo y derecho	14000	6	63000
U	Pluma	14000	10	105000
V	Tambor de izar	11000	8	66000
W	Caja de engranajes de izar	13000	6	52000
X	Caja de cadena	13000	8	78000
Y	Eje de giro izquierdo	6000	6	24000
Z	Eje de giro derecho	6000	6	24000
AA	Compresora auxiliar	11000	6	49500

Fuente : Estadística de maestranza y Depto. De equipo pesado C^o. Verde.

Cuadro No. 4.6

Vida reajustada y expectativa en horas de los componentes de Lectra Haul M-100

Cod	DESCRIPCION	V.E. Reajustado	No. De Reparaciones	Expectativa de vida
A	Motor diesel	16000	4	48000
B	Inyector, coj., propulsión eje de levas	6500	4	19500
C	Turbo izquierdo delantero	16000	2	28800
D	Turbo izquierdo posterior	16000	2	28800
E	Turbo derecho delantero	16000	2	28800
F	Turbo derecho posterior	16000	2	28800
G	Radiador	8000	2	14400
H	Arrancador neumático	3500	4	10500
I	Compresor	13000	4	39000
J	Blower de ventilador	12000	4	36000
K	Rueda motorizada derecha	9000	6	40500
L	Rueda motorizada izquierda	9000	6	40500
M	Cilindro de izar izquierdo	5000	4	15000
N	Cilindro de izar derecho	5000	4	15000
O	Suspensión delantera derecha	12000	6	54000
P	Suspensión delantera izquierda	12000	6	54000
Q	Suspensión posterior derecha	18000	6	81000
R	Suspensión posterior izquierda	18000	6	81000
S	Cojinete de rueda delantera izquierdo	6000	1	6000
T	Cojinete de rueda delantera derecho	6000	1	6000
U	Frenos delanteros	6000	1	6000
V	Frenos posteriores	4000	1	4000
W	Tolva	4000	8	24000
X	Chasis	6000	8	36000
Y	Bomba hidráulica en tandem	5000	2	9000
Z	Generador principal	11000	8	66000
AA	Armadura de rueda derecha	6500	6	26000
AB	Armadura de rueda izquierda	6500	6	26000
AC	Excitador	13000	6	52000
AD	Motor ventilador del dínamo	16000	6	64000

Fuente : Estadística de maestranza y Depto. De equipo pesado C^o. Verde.

4.4.5 COSTO HORARIO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos horarios de mantenimiento y de operación es el resultado de los insumos consumidos por hora de cada equipo, esto es multiplicado por el precio unitario de los productos; los datos se han obtenido de los archivos que obran en la oficina de

contabilidad y abastecimiento. En este caso sólo estamos presentando los costos referidos al año 1988. Como se pueden observar en los cuadros 4.7 y 4.8 y el resumen de los costos de operación y de mantenimiento por año se observan en los cuadros 4.9 y 4.10.

Cuadro No. 4.7

Costos horarios de operación y mantenimiento de las palas P&H 1900 –AL año 1988

Descripción	Consumo/hora	Costo Unit. En US\$	US\$/hora
A: COSTO DE OPERACION			
1. Energía eléctrica	401.62 Kw	0.666	26.78
2. Lubricantes:			
. Aceite GI-5, SAE 140	0.083 Gls	3.331	0.28
. Aceite SAE 30	0.011 Gls.	63.818	0.64
3. Grasas			
. Grasa crater 2X	2.25 Lbs.	2.050	4.30
. Grasa múltiple EP-2	2.98 Lbs.	2.585	7.76
4. Filtros	0.0006 Und.	105.478	0.06
5. Cables de izar	0.002 Und.	1104.141	2.21
6. Uñas de cucharón	0.0021 Und.	1547.619	3.25
7. Operador			5.57
8. Seguros			5.98
TOT. COSTO DE OPERACION			56.82
B: COSTO DE MANTENIMIENTO Y REPARACION			
1. Repuestos, materiales y servicios			29.85
2. Mano de obra			15.16
TOTAL COSTO DE MANTENIMIENTO Y REPARACION			45.01
TOTAL COSTO OPERATIVO			101.83

Fuente: Depto de equipo pesado y Datos estadísticos del taller de mastranza. Cº Verde

Cuadro No. 4.8

Costos horarios de operación y mantenimiento de Volquetes L.H. M-100 año 1988

Descripción	Consumo/hora	Costo Unit. En US\$	US\$/hora
A: COSTO DE OPERACIÓN			
1. Combustible	14.30 Gls.	1.26	17.95
2. Lubricantes:			
. Aceite de motor	0.46 Gls.	1.57	0.73
. Aceite hidráulico	0.25 Gls.	0.96	0.24
. Aceite transmisión	0.02 Gls.	16.50	0.33
3. Grasas	0.20 Lbs	0.85	0.17
4. Filtros			2.13
5. Llantas	0.007 Und.	15000.00	10.00
6. Operador			4.37
7. Seguros			1.79
TOT. COSTO DE OPERACION			37.71
B: COSTO DE MANTENIMIENTO Y REPARACION			
1. Repuestos, materiales y servicios			23.00
2. Mano de obra			10.69
TOTAL COSTO DE MANTENIMIENTO Y REPARACION			33.69
TOTAL COSTO OPERATIVO			1.40

Cuadro No. 4.9
COSTO PROMEDIO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE PALAS P&H 1900-AL

AÑOS	PROMEDIO HORAS TRABAJADAS		COSTO OPERACIÓN	COSTO MANTENIMIENTO
	ANUAL	ACUMULADO	US\$/HORA	US\$/HORA
1974	2140	2140	39,83	3,31
1975	4005	6145	44,32	3,48
1976	4150	10295	45,48	3,69
1977	4014	14309	44,40	5,35
1978	3970	18279	45,08	10,53
1979	4037	22316	48,61	9,48
1980	3855	26171	46,92	15,14
1981	4401	30572	49,16	17,28
1982	4094	34666	50,03	18,72
1983	3473	38139	49,83	25,61
1984	3636	41775	53,46	30,44
1985	2845	44620	53,20	33,76
1986	2980	47600	56,03	39,53
1987	2919	50519	55,47	44,18
1988	3270	53789	56,82	45,01
1989	3350	57139	56,95	45,95
1990	3290	60429	57,40	46,30
1991	3185	63614	56,98	47,05
1992	3908	67522	58,31	48,55

Fuente: Depto de planeamiento y equipo pesado C^o verde

4.5 APLICACIÓN PRACTICA DEL MODELO DE REEMPLAZAMIENTO

De los tres modelos descritos en el presente trabajo de investigación, se realiza la aplicación práctica de dos modelos, las cuales son: **Modelo de reemplazamiento de equipo por el método del costo acumulativo por horas** y el **modelo de reemplazo de equipo por el método de índices de rentabilidad**, para los equipos de carga (pala P&H 1900-AL) y para los equipos de transporte (volquetes L.H. M-100).

Los equipos en mención han operado por encima de su vida económica y no se ha hecho un estudio de reemplazamiento; como se puede apreciar en los cuadros anteriores. Los costos de mantenimiento y operación han incrementado bastante con el correr del tiempo como se aprecian en los cuadros 4.9 y 4.10. Por lo cual en el presente trabajo de investigación nos da una referencia en qué momento los equipos deberían de pensarse en reemplazar sus componentes o el conjunto del equipo.

Cuadro No. 4.10

COSTO PROMEDIO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE CAMIONES L.H. M-100				
AÑOS	PROMEDIO HORAS TRABAJADAS		COSTO OPERACIÓN	COSTO MANTENIMIENTO
	ANUAL	ACUMULADO	US\$/HORA	US\$/HORA
1975	266	266	28,68	6,79
1976	4420	4686	30,14	7,13
1977	4514	9200	33,18	15,90
1978	4624	13824	33,01	13,43
1979	4643	18467	31,93	15,93
1980	4627	23094	34,74	18,86
1981	4598	27692	33,11	19,05
1982	4677	32369	35,23	16,97
1983	3928	36297	32,42	25,14
1984	3687	39984	36,50	30,45
1985	4033	44017	36,20	27,21
1986	4545	48562	36,37	30,77
1987	3459	52021	35,85	33,41
1988	3844	55865	37,71	33,69
1989	3950	59815	36,55	34,15
1990	4520	64335	37,42	34,82
1991	4250	68585	37,82	36,16
1992	4125	72710	38,15	37,05

Fuente: Depto. de planeamiento y equipo pesado Cº verde

4.6 MODELO DE REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS POR EL METODO DE COSTO ACUMULATIVO POR HORAS

El modelo se basa en aplicar la teoría económica a los problemas de reemplazo de equipos; este modelo nos indica que el reemplazo debería de ser efectuada al final de la vida económica del equipo, lo cual ocurre generalmente antes. La vida económica según muchos autores está dado por el año de propiedad del activo en la cual la suma del costo de Inversión promedio por unidad de trabajo y el costo operativo promedio (operación y de mantenimiento) por unidad de trabajo sean mínimos.

Para calcular el momento de reemplazo de la unidad se necesita emplear las ecuaciones matemáticas descritas en el punto 3.5.3 del capítulo 3.

4.6.1 CALCULO ANALITICO DE REEMPLAZO DE LA PALA P&H 1990-AL

Una manera simple de conjugar los factores mencionados en el capítulo 3 y los valores de los cuadros del capítulo 4, es llevar estos valores a una ecuación de regresión lineal, con los valores de horas acumuladas de trabajo, costo horario de operación y mantenimiento.

Datos de adquisición de la Pala P&H 1990-AL

- Valor de Adquisición (costo CIF) = US\$ 2'300,000.00
- Vida estimada para depreciación = 40,000.00 horas
- Fecha de Compra (Palas No. 1, 2, 3 y 4) = 30 – Junio – 1974

a) Ecuación del costo horario de Inversión

Teniendo en cuenta la ecuación del punto 3.5.3 del capítulo 3 tenemos:

$$Y = (I - Vr)/X$$

Donde:

Y : Costo promedio por hora trabajada en US\$.

I : Valor del equipo nuevo (US\$ 2'300,000.00)

Vr : Valor residual del equipo (102,700.00) *

X : Horas acumuladas de trabajo

(*) : Valor tasado por Cyprus Metals en el momento de adquirir a Minero Perú

Reemplazando datos tenemos:

$$Y = \frac{(2'300,000.0 - 102,700.0)}{X} = \frac{2197,300.00}{X} ; r = 1$$

b) Ecuación del costo horario de Operación

Con los datos del cuadro 4.9, horas acumuladas de trabajo y costo de operación por año se obtiene el cuadro No. 4.11; con los valores de dicho cuadro se obtiene la ecuación del costo horario de operación mediante regresión lineal.

$$Y = a + b(X)$$

Donde:

Y = Costo horario promedio de operación o mantenimiento

X = Horas trabajadas acumuladas por año

a, b se obtienen mediante las ecuaciones formuladas en el punto 3.5.3 capítulo 3.

En el cuadro 4.11 los valores de:

X : Representa a las horas acumuladas de trabajo por año

Y : Representa el costo de operación en US\$/hora.

Cuadro No. 4.11

Valores para obtener la ecuación de regresión lineal

X	Y	X.Y	X ²	Y ²
2140	39,83	85236,2	4579600	1586,43
6145	44,32	272346,4	37761025	1964,26
10295	45,48	468216,6	105987025	2068,43
14309	44,40	635319,6	204747481	1971,36
18279	45,08	824017,3	334121841	2032,21
22316	48,61	1084781	498003856	2362,93
26171	46,92	1227943	684921241	2201,49
30572	49,16	1502920	934647184	2416,71
34666	50,03	1734340	1201731556	2503,00
38139	49,83	1900466	1454583321	2483,03
41775	53,46	2233292	1745150625	2857,97
44620	53,20	2373784	1990944400	2830,24
47600	56,03	2667028	2265760000	3139,36
50519	55,47	2802289	2552169361	3076,92
53789	56,82	3056291	2893256521	3228,51
57139	56,95	3254066	3264865321	3243,30
60429	57,40	3468625	3651664041	3294,76
63614	56,98	3624726	4046740996	3246,72
67522	58,31	3937208	4559220484	3400,06
Σ 690039	968,28	37152893,7	32430855879	49907,6868

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos del cuadro son:

- Promedios aritméticos de X, Y son: (X = 36317.84 ; Y = 50.9621)
- a = 41.170485
- b = 0.0002696

Por lo tanto la ecuación será:

$$Y = 41.170485 + 0.0002696(X) \quad ; \quad r = 0.953$$

c) Ecuación del costo horario de Mantenimiento

Con los datos del cuadro 4.9 , horas acumuladas de trabajo y costo horario de mantenimiento se obtiene un cuadro similar a 4.11; con los valores de dicho cuadro se obtiene la ecuación del costo horario de mantenimiento mediante regresión lineal.

Los valores obtenidos de dicho cuadro son:

- Promedios aritméticos de X, Y son: (X = 36317.84 ; Y = 49.36)
- a = -4.519971
- b = 0.0008394

Por lo tanto la ecuación será:

$$Y = - 4.519971 + 0.0008394(X) \quad ; \quad r = 0.957$$

d) Ecuación del costo total

Sumando las tres ecuaciones obtenidas en los puntos a, b y c se tiene:

$$Y = (2197300/X) + 0.001109(X) + 36.65051 \quad ; \quad r = 0.97$$

Las cuatro ecuaciones obtenidos se grafican para estimar el punto más bajo (costo mínimo de la curva), como se puede observarse en la figura 4.1.

e) Cálculo del costo mínimo total (punto óptimo de reemplazo de Palas P&H)

De la ecuación del costo total se tiene:

$$Y = (2197300/X) + 0.001109(X) + 36.65051 \quad ; \quad r = 0.97$$

$$dY/dX = (2197300/X^2) + 0.001109$$

$$\text{Si } dY/dX = 0$$

$$X = 44,512.00 \text{ horas}$$

$$Y = 135.37 \text{ US\$/hora}$$

Considerando el radio de correlación de 0.97 se tiene:

$$X_{\text{máx.}} = 44,512/0.97 = 45,889.00 \text{ horas}$$

$$Y_{\text{mín.}} = 135.378/0.97 = 139.56 \text{ US\$/hora.}$$

El cálculo del costo total mínimo promedio por unidad de trabajo $Y_{\text{mín.}} = 139.56$ US\$/hora trabajado, con un máximo de $X_{\text{máx.}} = 45,889$ horas trabajadas; estos valores nos indican que a partir de este punto los costos acumulados por hora se van incrementando a medida que se aumente las horas de trabajo. Entonces a partir de este tiempo se puede pensar en reemplazar los componentes de los equipos o el conjunto del equipo.

4.6.2 CALCULO ANALITICO DE REEMPLAZO DEL VOLQUETE L.H M-100

De manera similar para el cálculo para la Pala P&H, se realizan los cálculos para el Volquete Lectra Haul M-100; en este caso se usa los valores del cuadro 4.10 y las ecuaciones 3.5.3 del capítulo 3.

Datos de adquisición del Volquete Lectra Haul M-100

- Valor de Adquisición (costo CIF) = US\$ 717,835.00
- Menos costo de llantas = US\$ 50,000.00
- Valor depreciable = US\$ 667,825.00
- Vida estimada para depreciación = 25,000.00 horas
- Valor residual = US\$ 10,000.00
- Fecha de compra : (Volquetes No. 11, 12, 13 y 14) = 31 – Nov. – 1975
: (Volquetes No. 15 y 16) = 25 - Feb. - 1976

a) Ecuación del costo horario de Inversión

Teniendo en cuenta la ecuación del punto 3.5.3 del capítulo 3 tenemos:

$$Y = \frac{(667,825.0 - 10,000.0)}{X} = \frac{657,825.00}{X} ; r = 1$$

b) Ecuación del costo horario de Operación

Con los datos del cuadro 4.10, se confecciona el cuadro No.4.12, con los valores de dicho cuadro se obtiene la ecuación del costo horario de operación mediante regresión lineal.

En el cuadro 4.12 los valores de (X, Y) representan:

X : Las horas acumuladas de trabajo por año

Y : El costo de operación en US\$/hora.

Cuadro No. 4.12

Valores para obtener la ecuación de regresión lineal para L.H. M-100

X	Y	X*Y	X ²	Y ²
266	28,68	7628,88	70756	822,54
4686	30,14	141236	21958596	908,42
9200	33,18	305256	84640000	1100,91
13824	33,01	456330,2	191102976	1089,66
18467	31,93	589651,3	341030089	1019,52
23094	34,74	802285,6	533332836	1206,87
27692	33,11	916882,1	766846864	1096,27
32369	35,23	1140360	1047752161	1241,15
36297	32,42	1176749	1317472209	1051,06
39984	36,50	1459416	1598720256	1332,25
44017	36,20	1593415	1937496289	1310,44
48562	36,37	1766200	2358267844	1322,78
52021	35,85	1864953	2706184441	1285,22
55865	37,71	2106669	3120898225	1422,04
59815	36,55	2186238	3577834225	1335,90
64335	37,42	2407416	4138992225	1400,26
68585	37,82	2593885	4703902225	1430,35
72710	38,15	2773887	5286744100	1455,42
Σ671789	625,01	24288457	33733246317	21831,0757

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos del cuadro son:

- Promedios aritméticos de X, Y son: ($X = 35357.316$; $Y = 32.8952$)
- $a = 28.9677179$
- $b = 0.000111082$

Por lo tanto la ecuación será:

$$Y = 28.9677179 + 0.00011108(X) \quad ; \quad r = 0.828$$

b) Ecuación del costo horario de Mantenimiento

Con los datos del cuadro 4.10 , horas acumuladas de trabajo y costo horario de mantenimiento y por medio de un cuadro similar al cuadro 4.12, se obtiene la ecuación del costo horario de mantenimiento mediante regresión lineal.

Los valores obtenidos de dicho cuadro son:

- Promedios aritméticos de X, Y son: ($X = 35357.31579$; $Y = 22.995263$)
- $a = 7.6195048$
- $b = 0.000434868$

Por lo tanto la ecuación será:

$$Y = 7.6195048 + 0.000434868(X) \quad ; \quad r = 0.9402$$

d) Ecuación del costo total

Sumando las tres ecuaciones de los puntos anteriores a, b y c se tiene:

$$Y = (657825/X) + 0.000546(X) + 36.587224 \quad ; \quad r = 0.92$$

Las cuatro ecuaciones obtenidos se grafican para estimar el punto más bajo (costo mínimo de la curva), como se puede observarse en la figura 4.2.

e) Cálculo del costo mínimo total (punto óptimo de reemplazo del Volquete L.H M-100)

De la ecuación del costo total se tiene:

$$Y = (657825/X) + 0.000546(X) + 36.587224 \quad ; \quad r = 0.92$$

$$dY/dX = (657825/X^2) + 0.000546$$

$$\text{Si } dY/dX = 0$$

$$X = 34,710.00 \text{ horas}$$

$$Y = 174.4909 \text{ US\$/hora}$$

Considerando el radio de correlación de 0.92 se tiene:

$$X_{\text{máx.}} = 34,710/0.92 = 37,728.00 \text{ horas}$$

$$Y_{\text{mín.}} = 74.4909/0.92 = 80.968 \text{ US\$/hora.}$$

El cálculo del costo total mínimo promedio por unidad de trabajo $Y_{\text{mín}} = 80.968$ US\$/hora trabajado, con un máximo de $X_{\text{máx}} = 37,728.00$ horas trabajadas; a partir de dicho punto los costos acumulados por hora se van incrementando con el tiempo de servicio. Por lo tanto se puede pensar en reemplazar el equipo a partir de este punto como se puede observa en la figura 4.2.

4.7 MODELO DE REEMPLAZAMIENTO DE EQUIPO POR EL METODO DE INDICES DE RENTABILIDAD ECONOMICA

El principio es determinar la vida óptima del equipo, en la cual se considera los costos de propiedad o adquisición, el valor residual y el costo de operación y mantenimiento. El modelo consiste en aplicar las ecuaciones planteadas en los puntos 3.6.2, 3.6.4, 3.6.5, 3.6.6, 3.6.7.1 y 3.6.7.2; Con estas ecuaciones se procede a calcular los parámetros necesarios para poder predecir el momento del reemplazo del equipo en estudio.

4.7.1 CALCULO ANALITICO DE REEMPLAZO DE LA PALA P&H 1900-AL

4.7.1.1 Estimación del Valor Residual de la Pala

En el punto 3.6.2 del capítulo 3 se tiene la ecuación:

$$V_r = K \cdot a^n \cdot B^H$$

$$V_r = K(e^{-0.25})^n$$

Donde K es el del valor del equipo en el año de estudio; para nuestro caso para $n = 1$; ($K = 2'300,000.00$). El valor residual estimado del capital para el caso del estudio al final de los 15 años de operación, con un promedio de 3,584 horas de trabajo neto por año tiene un valor de 2.35 %, como se puede apreciarse en el cuadro No.4.13. y figura 4.3

Cuadro No. 4.13

Valor residual de la pala P&H 1900 – AL

No. años	Coficiente Val. Resd.	Val. Resd. (%)	Val. Resd. US\$	No. años	Coficiente Val. Resd.	Val. Resd. (%)	Val. Resd. US\$
1	0,7788	77,88	1791240,00	11	0,0839	8,39	147032,45
2	0,6085	60,85	1395017,71	12	0,0498	4,98	114508,88
3	0,4724	47,24	1086439,79	13	0,0388	3,88	89179,51
4	0,3879	38,79	848119,31	14	0,0302	3,02	69453,00
5	0,2885	28,85	658957,72	15	0,0235	2,35	54090,00
6	0,2231	22,31	513198,27	16	0,0183	1,83	42125,29
7	0,1738	17,38	399677,26	17	0,0143	1,43	32807,18
8	0,1353	13,53	311288,85	18	0,0111	1,11	25550,23
9	0,1054	10,54	242416,02	19	0,0087	0,87	19898,52
10	0,0821	8,21	188793,60	20	0,0087	0,87	15498,97

Fuente: Elaboración propia.

4.7.1.2 Estimación de la evolución del capital adeudado, amortización e intereses de la Pala P&H 1900-AL

Tomando de referencia la ecuación del punto 3.6.3 se estima la evolución de la amortización e intereses del equipo en estudio. En el cuadro 4.14 se presenta los cálculos de amortización financiera del capital prestado para la adquisición de un equipo cuyo valor de adquisición es de US\$ 2'300,000.00 a una tasa de interés de 18% anual, con una vida de préstamo de 10 años; por lo cual la anualidad calculada es de:

$$a = \frac{2'300,000.0 \times 0.18(1 + 0.18)^{10}}{(1 + 0.18)^{10} - 1} = 511783.675$$

Cuadro No. 4.14

Evolución del capital adeudado, Amortización e Intereses de la Pala P&H 1900-AL

No. años	Capital Adeudado	Interés Anual	Amortización Anual	Anualidad	Capital Amortizado	Cap. Pendiente Amortizado
1	2300000,00	414000,00	97783,68	511783,68	97783,68	2202216,33
2	2202216,33	396398,94	115384,74	511783,68	213168,41	2086831,59
3	2086831,59	375629,69	136153,99	511783,68	349322,40	1950677,60
4	1950677,60	351121,97	160661,71	511783,68	509984,11	1790015,89
5	1790015,89	322202,86	189580,81	511783,68	699564,92	1600435,08
6	1600435,08	288078,31	223705,36	511783,68	923270,28	1376729,72
7	1376729,72	247811,35	263972,33	511783,68	1187242,61	1112757,39
8	1112757,39	200296,33	311487,34	511783,68	1498729,95	801270,05
9	801270,05	144228,61	367555,07	511783,68	1866285,02	433714,98
10	433714,98	78068,70	433714,98	511783,68	2300000,00	0,00
		2817836,75	2300000,00			

Fuente: Elaboración propia.

4.7.1.3 Cálculo del Costo de propiedad de la Pala P&H 1900-AL

Para calcular el costo de propiedad, se considera el valor de adquisición de la Pala P&H 1900-AL a un costo de US\$ 2'300,000.00 al año 1974, a una tasa de interés de 18% anual; amortizable en 10 años por el método de anualidad constante, que dan lugar a cargas financieras anuales decrecientes durante la vida económica del equipo.

La disponibilidad del equipo, se calcula a partir de un tiempo total posible (TTP) que es igual en nuestro caso a 7176 horas por año. Para estimar este tiempo se parte de un tiempo teórico (TT) que resulta al hacer las siguientes consideraciones:

$$TT = \frac{8 \text{ horas}}{\text{gdia.}} \times \frac{3 \text{ gdias}}{\text{día}} \times \frac{6 \text{ días}}{\text{semana}} \times \frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}} = 7488 \text{ horas/año}$$

Considerando los días domingos, feriados y festivos por año (DF), tenemos el total de días feriados:

$$DT = \frac{8 \text{ horas}}{\text{gdia.}} \times \frac{3 \text{ gdias}}{\text{día}} \times \frac{13 \text{ días}}{\text{año}} = 312 \text{ horas/año}$$

Restando los días feriados al tiempo teórico tenemos el tiempo total posible (TTP).

$$TTP = TT - DF = 7488 - 312 = 7176 \text{ horas/año.}$$

Empleando la ecuación del punto 3.6.4 se calculan los valores de costo de propiedad en el cuadro 4.15, estos valores se observan en la figura 4.4.

$$CPR = \frac{A \cdot i [(1 + i)^n - e^{-0.25(n)}]}{TTP [(1 + i)^n - 1]}$$

Donde $A = V_0 + I$

V_0 : Precio de adquisición del equipo nuevo (US\$ 2300,000.00)

I : Costo financiero del capital generado por los intereses (US\$ 2'817,836.75)

4.7.1.4 Cálculo del costo de operación de la Pala P&H 1900-AL

Los datos de los costos de operación son aleatorios, por lo tanto estos valores se ajustan a una ecuación de regresión lineal en función del año de servicio, teniendo en cuenta los valores del cuadro 4.9. Para el caso en estudio se ha estimado las siguientes ecuaciones:

- Costo horario de operación : $41.28982 + 0.96722(X)$; $r = 0.948$
- Costo horario de mantenimiento : $-4.32561 + 3.02919(X)$; $r = 0.964$
- Costo total de operación : $36.964206 + 3.99641(X)$; $r = 0.95$

Integrando la ecuación del costo total de operación, según su variable tiempo en función del número de años (n) de servicio u operación del equipo se tiene:

$$COP = (1/n) \int_0^n [36.964206 + 3.99641(X)] dx$$

$$COP = (1/n) [36.964206 + (1/2)(3.99641)n^2]$$

$$COP = 36.964206 + 1.9982n$$

La evolución del costo de operación de la pala durante los 20 años de servicio, calculado con la ecuación anterior se observa en el cuadro 4.15 y fig. 4.4.

4.7.1.5 Determinación de la vida óptima de la Pala P&H 1900-AL

Para determinar la vida óptima del equipo se suma el costo de propiedad y el costo de operación; en donde la suma representa al costo horario anual medio de producción (CMP). Para nuestro caso tenemos:

$$CMP = CPR + COP$$

$$CMP = \frac{A \cdot i [(1+i)^n - e^{-0.25(n)}]}{TTP [(1+i)^n - 1]} + (1/n) \int_0^n f(X) dx$$

$$CMP = \frac{A \cdot i [(1+i)^n - e^{-0.25(n)}]}{TTP [(1+i)^n - 1]} + [36.964206 + 1.9982n]$$

Donde:

CMP = Costo promedio anual de producción en la vida del equipo \$/hora.

CPR = Costo horario de propiedad o posesión del equipo \$/hora.

COP = Costo horario de operación del equipo n años después de su adquisición \$/hora.

A = Costo asignado, formado por el costo de capital generado por los intereses y el costo de adquisición del equipo nuevo.

= Tasa de interés anual del capital (18%).

TTP = Tiempo total posible de utilización del equipo.

n = Edad del equipo expresado en años.

f(x) = Costo de operación t años después de su adquisición.

El costo de propiedad va decreciendo con los años de servicio del equipo, debido a la depreciación que éste experimenta por el desgaste físico u obsolescencia, lo que puede inducir a prolongar indefinidamente la vida del equipo. Mientras que el costo de operación se incrementa con la edad del equipo, debido principalmente al costo de mantenimiento y reparación, unido a ello la pérdida de disponibilidad y rendimiento por el aumento de las horas de parada. Si el costo de operación es muy elevado va a propiciar un reemplazo adelantado del equipo.

La vida óptima del tiempo de utilización de un equipo se obtiene graficando el costo de producción compuesto por los costos de operación y propiedad para los diferentes años de vida, en función al tiempo de servicio en años del equipo en estudio, reemplazando valores en las ecuaciones se obtienen los resultados del cuadro 4.15 y la figura 4.4.

Cuadro No. 4.15

Costos de operación, propiedad y producción de la Pala P&H 1900-AL

No. Años	Costo de Propiedad	Costo de Operación	Costo total de Producción
1	286,130	38,962	325,092
2	257,097	40,961	298,058
3	233,710	42,959	276,669
4	214,814	44,957	259,771
5	199,501	46,955	246,456
6	187,054	48,953	236,007
7	176,906	50,952	227,858
8	168,608	52,950	221,558
9	161,803	54,948	216,751
10	156,206	56,946	213,152
11	151,590	58,944	210,534
12	147,774	60,943	208,717
13	144,612	62,941	207,553
14	141,984	64,939	206,923
15	139,797	66,937	206,734
16	137,973	68,935	206,908
17	136,448	70,934	207,382
18	135,172	72,932	208,104
19	134,103	74,930	209,033
20	133,205	76,928	210,133

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la figura 4.4. se deduce que la pendiente de la curva que representa el costo de producción se hace cero en 13 a 15 años. Por lo tanto, en este punto el costo de producción se hace mínimo, permitiendo plantear el reemplazo del equipo en condiciones favorables o ventajosas, ya que si se prolonga la vida en servicio del equipo se podría incurrir en costos operativos crecientes en sentido ascendente cada año de operación.

4.7.1.6 Cálculo de reposición de la Pala P&H 1900-AL mediante el criterio del VAN, sobre el margen de operaciones.

Si consideramos un inmovilizado igual al valor inicial de compra del equipo nuevo (V_0), a partir del cual se obtendrá varios flujos de beneficio durante los años de servicio del equipo, hasta llegar a un año n en el cual solo se considera como ingreso el valor residual del equipo (V_r). Este cálculo se puede realizar mediante la siguiente expresión:

$$VAN = \frac{B_1}{(1+i)} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+i)^n} + \frac{V_r}{(1+i)^n} - V_0$$

Donde :

- V_0 = Valor inicial de adquisición del equipo nuevo
- V_r = Valor residual del equipo en uso en el año n .
- B_n = Beneficios resultantes al final de cada año.
- i = Tasa de interés del capital.
- n = Número de años en servicio del equipo

Si utilizamos la ecuación planteada, en calcular la vida del equipo y plantear su reemplazo se tiene los siguientes inconvenientes: Primero es que no es fácil determinar los beneficios de cada año, porque dependen del producto obtenido y éste, está sujeto a muchas variables en el mercado, tanto a corto como a largo plazo. Segundo, es complicado aplicar y despejar (n) cuyo valor debe hacer que el beneficio sea máximo.

Por lo cual para la reposición de equipos mediante el criterio del VAN es fácil aplicar el margen de operaciones. La idea básica es simplemente hallar la diferencia acumulada del costo de operación de cada año, con respecto al costo operativo del primer año al cual

se ha incurrido utilizando el equipo nuevo, que teóricamente debe tener el costo mínimo de operación. A las diferencias de operación se considera como beneficios generados, si no se hubiera incurrido en el incremento del costo de operación; considerando constante el costo de propiedad trabaje o no el equipo. A partir de las diferencias de los costos de operación se determinan varios flujos hasta llegar a (n-1) años de vida del equipo.

Para el cálculo se emplea la siguiente expresión:

$$VAN = \frac{C_1 - C_0}{(1+i)} + \frac{C_2 - C_0}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C_n - C_0}{(1+i)^n} + - C_m$$

Donde:

C_0 = Costo de operación en el primer año de servicio del equipo.

C_n = Costo de operación en el año n de vida del equipo.

C_m = Inmovilizado de capital al margen de operación; que es la media ponderada de la diferencia de los costos para cada año (n) de vida del equipo.

i = Tasa de actualización igual a 18%

n = Número de años de la vida del equipo.

Los resultados del VAN se pueden apreciar en el cuadro No. 4.16 y en la figura No. 4.5, en donde se observa que se obtiene el mayor VAN en los años 11 a 13 en la que es un indicador más sobre la vida del equipo y el momento en el que éste lograría producir costo mínimo y nos permitiría plantear el posible reemplazo del equipo, en donde la ventaja económica sea mayor.

Los valores obtenidos para nuestro caso, según la pendiente de la recta, el incremento anual del costo de operación es de 1.999 \$/hora. Por lo tanto si se continúa utilizando el equipo los valores del VAN siguen siendo superiores al incremento anual del costo de operación; pero cada año tendrá una diferencia menor, ya que la curva del VAN tiende a descender una vez alcanzado el máximo valor. Lo que nos indica que habrá menores beneficios si el equipo sigue trabajando, con costo de operación cada vez mayor y crecientes.

4.7.1.7 Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) sobre el margen del costo de operación en reemplazo para la Pala.

Con los datos del VAN obtenidos para distintos flujos se mide la rentabilidad, interpolando los valores del VAN menor y VAN mayor, empleando la ecuación del punto 3.6.7.2 del capítulo 3. Entonces tenemos los siguientes resultados cuadro 4.17 fig. 4.6:

Cuadro No. 4.17

Valores del TIR y TIR corregido sobre el margen del costo de operación.

Tiempo años	Tasa Menor (%)	VAN Positivo	Tasa Mayor	VAN Negativo	TIR (%)	TIR(%) Corregido
1	0	0	5	-0,09519	0	-0,042
2	90	0,05410	95	-0,02152	93,577	97,434
3	80	0,04599	85	-0,03144	82,970	86,385
4	70	0,02389	75	-0,06038	71,417	74,351
5	60	0,00982	70	-0,10742	60,838	63,331
6	50	0,01707	55	-0,11197	50,661	52,731
7	45	0,02016	50	-0,12177	45,710	47,573
8	40	0,02815	45	-0,12918	40,894	42,557
9	35	0,04817	40	-0,12913	36,358	37,832
10	35	0,04282	40	-0,14705	36,128	37,591
11	35	0,02171	40	-0,17517	35,551	36,991
12	30	0,02241	40	-0,20859	30,970	32,219
13	30	0,00980	35	-0,22901	30,205	31,422
14	25	0,02562	30	-0,23326	25,495	26,515
15	25	0,02761	30	-0,24528	25,506	26,527
16	25	0,01969	30	-0,26237	25,349	26,364
17	25	0,00475	30	-0,28261	25,083	26,086
18	20	0,02404	25	-0,28642	20,387	21,195
19	20	0,03273	25	-0,29513	20,499	21,312

Fuente: Elaboración propia

A la tasa interna de retorno es necesario corregirla por efectos de la inflación, en este caso asumimos una inflación promedio del dólar americano por 4% anual, los resultados se observan el cuadro 4.17 última columna.

Según el cuadro No. 4.17 y la figura 5.6 la mayor rentabilidad se obtendrá con el flujo del año 2. Para los valores posteriores a este año siguen siendo superiores a la tasa de interés de capital que en nuestro caso es de 18% anual; por lo que habrá que buscar hasta que tiempo (n) se puede prolongar la utilización del equipo en condiciones económicamente ventajosa.

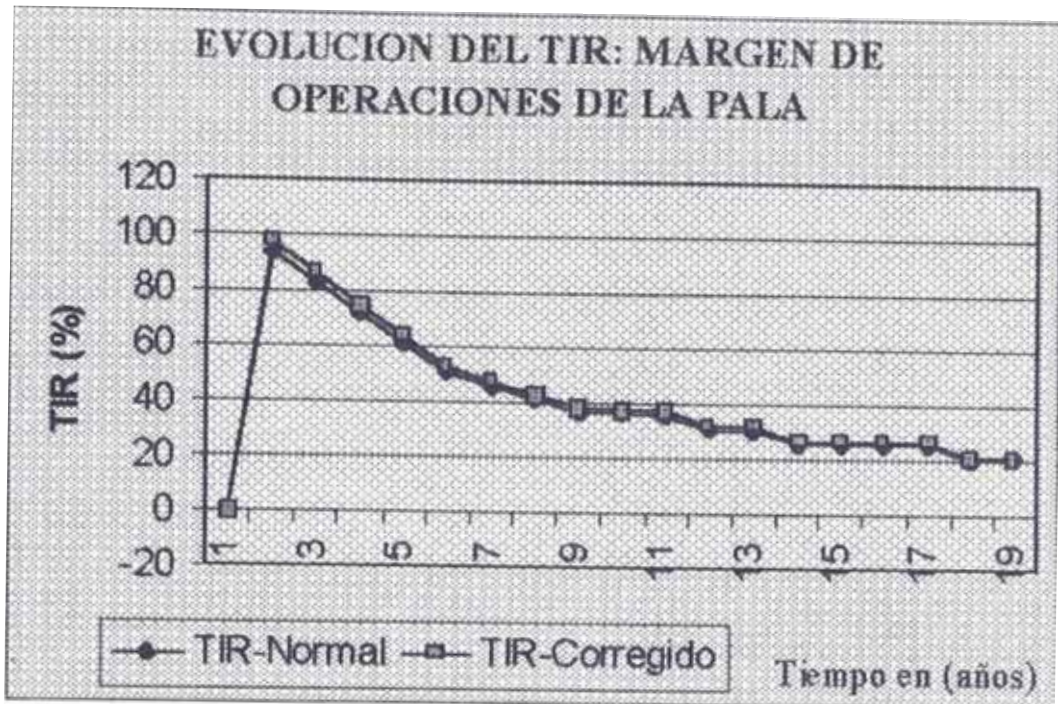


Figura 4.6

Una vez alcanzado el valor máximo la curva del TIR corregido desciende con pendiente negativa fuerte hasta el año 9 y a partir del año 10 en adelante, la pendiente tiene a ser más moderada.

Si representamos el valor en porcentaje que desciende el TIR corregido cada año a partir de su valor máximo obtenido, que es de 97.434 en el año 2. Tal como se presenta en el cuadro 4.18 y la figura 4.7 a manera de frecuencia relativa en función del tiempo y el porcentaje acumulado sobre las diferencias del TIR año por año, se ve que la nueva curva cambia de sentido a partir del año 10; constituyese como un indicador más sobre el tiempo oportuno para pensar en un posible reemplazo del equipo.

4.7.2 CALCULO ANALITICO DE REEMPLAZO DEL VOLQUETE L.H M-100

Todo los fundamentos teóricos en los diferentes cálculos se ha especificado en el punto 4.7.1, relacionado en cálculos realizados para la Pala P&H 1900-AL. Por lo tanto para realizar los cálculos del reemplazo del Volquete L.H. M-100 solo se especificarán los valores obtenidos , con las ecuaciones respectivas tratados en el punto 3.6.2 .

4.7.2.1 Estimación del Valor Residual del Volquete Lectra Haul M-100

En el punto 3.6.2 del capítulo 3 se tiene la ecuación:

$$V_r = K(e^{-0.25})^n$$

(K = 667,825.00). El valor residual del capital para el caso del volquete L.H. M-100 se puede apreciarse en el cuadro No.4.19. y figura 4.8

Cuadro No. 4.19
Valor residual del Volquete L.H. M-100 (x 1000)

No. años	Coficiente Val. Resd.	Val. Resd. (%)	Val. Resd. US\$	No. años	Coficiente Val. Resd.	Val. Resd. (%)	Val. Resd. US\$
1	0,7788	77,88	520,10	11	0,0639	6,39	42,69
2	0,6065	60,65	405,06	12	0,0498	4,98	33,25
3	0,4724	47,24	315,46	13	0,0388	3,88	25,89
4	0,3679	36,79	245,68	14	0,0302	3,02	20,17
5	0,2865	28,65	191,33	15	0,0235	2,35	15,71
6	0,2231	22,31	149,01	16	0,0183	1,83	12,23
7	0,1738	17,38	116,05	17	0,0143	1,43	9,53
8	0,1353	13,53	90,38	18	0,0111	1,11	7,42
9	0,1054	10,54	70,39	19	0,0087	0,87	5,78
10	0,0821	8,21	54,82	20	0,0067	0,67	4,50

Fuente: Elaboración propia.

4.7.2.2 Estimación de la evolución del capital adeudado, amortización e intereses del Volquete Lectra Haul M-100.

Tomando de referencia la ecuación del punto 3.6.3 se estima los valores en el cuadro 4.20 ; cuyo valor de adquisición es de US\$ 667,825.00 a una tasa de interés de 18% anual, con una vida de préstamo de 10 años; por lo cual la anualidad calculada es de:

$$a = \frac{667,825.0 \times 0.18(1 + 0.18)^{10}}{(1 + 0.18)^{10} - 1} = 148600.84$$

Cuadro No. 4.20

Evolución del capital adeudado, Amortización e Intereses del Volquete L.H. M-100

No. años	Capital Adeudado	Interés Anual	Amortización Anual	Anualidad	Capital Amortizado	Cap. Pendiente Amortizado
1	667825,00	120208,50	28392,34	148600,84	28392,34	639432,66
2	639432,66	115097,88	33502,96	148600,84	61895,30	605929,70
3	605929,70	109067,35	39533,49	148600,84	101428,80	566396,20
4	566396,20	101951,32	46649,52	148600,84	148078,32	519746,68
5	519746,68	93554,40	55046,44	148600,84	203124,76	464700,24
6	464700,24	83646,04	64954,80	148600,84	268079,55	399745,45
7	399745,45	71954,18	76646,66	148600,84	344726,21	323098,79
8	323098,79	58157,78	90443,06	148600,84	435169,27	232655,73
9	232655,73	41878,03	106722,81	148600,84	541892,08	125932,92
10	125932,92	22667,93	125932,91	148600,84	667824,99	0,01
		818183,41	667824,99			

Fuente: Elaboración propia.

4.7.2.3 Cálculo del Costo de propiedad del Volquete L.H. M-100

Teniendo presente los siguientes datos:

- Valor de adquisición : US\$ 667,825. al año 1974
- Tasa de interés : 18% anual; amortizable en 10 años
- Tiempo total posible (TTP) de trabajo : 7176 horas por año

Empleando la ecuación del punto 3.6.4 se calculan los valores del cuadro 4.21, fig. 4.9.

Donde $A = V_0 + I$

V_0 : Precio de adquisición del equipo nuevo (US\$ 667,825.00)

I : Costo financiero del capital generado por los intereses (US\$ 818,183.41)

4.7.2.4 Cálculo del costo de operación del Volquete L.H. M-100

Los datos de los costos de operación son aleatorios, por lo tanto estos valores se ajustan a una ecuación de regresión lineal, teniendo en cuenta los valores del cuadro 4.10. Para el caso en estudio se ha estimado las siguientes ecuaciones:

- Costo horario de operación : $28.684767 + 0.467832(X)$; $r = 0.822$
- Costo horario de mantenimiento : $6.4621052 + 1.837017(X)$; $r = 0.938$
- Costo total de operación : $35.1468722 + 2.304849(X)$; $r = 0.92$

Integrando la ecuación del costo total de operación, se tiene:

$$COP = (1/n) \int_0^n [35.1468722 + 2.304849(X)] dx$$

$$COP = (1/n) [35.1468722 + (1/2)(2.304849)n^2]$$

$$COP = 35.1468722 + 1.1524245n$$

La evolución del costo de operación del Volquete se muestra en el cuadro 4.20 y fig. 4.9.

4.7.2.5 Determinación de la vida óptima del Volquete L.H. M-100

Es la suma del costo de propiedad y el costo de operación; en donde la suma representa al costo horario anual medio de producción (CMP). Para nuestro caso tenemos:

$$CMP = \frac{A.i [(1+i)^n - e^{-0.25(n)}]}{TTP[(1+i)^n - 1]} + [35.1468722 + 1.1524245n]$$

Los resultados de la vida óptima del tiempo de utilización de un equipo se obtiene en el cuadro 4.21 y la figura 4.9.

Cuadro No. 4.21
Costos de operación, propiedad y producción del Volquete L.H. M-100

No. años	Costo de Propiedad	Costo de Operación	Costo total Producción
1	83,080	36,299	119,380
2	74,650	37,452	112,102
3	67,860	38,604	106,464
4	62,373	39,757	102,130
5	57,927	40,909	98,836
6	54,313	42,061	96,374
7	51,366	43,214	94,580
8	48,957	44,366	93,323
9	46,981	45,519	92,500
10	45,356	46,671	92,027
11	44,016	47,824	91,839
12	42,908	48,976	91,884
13	41,989	50,128	92,118
14	41,226	51,281	92,507
15	40,591	52,433	93,025
16	40,062	53,586	93,647
17	39,619	54,738	94,357
18	39,248	55,891	95,139
19	38,938	57,043	95,981
20	38,677	58,195	96,873

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la figura 4.10. se deduce que la pendiente de la curva que representa el costo de producción se hace cero en los años 10 a 11. Por lo tanto, en este punto el costo de producción se hace mínimo, permitiendo plantear el reemplazo del equipo.

4.7.2.6 Cálculo de reposición mediante el VAN del Volquete Lectra Haul M-100.

Considerando el mismo procedimiento de la pala y empleando las mismas ecuaciones. Los resultados del VAN para el Lectra Haul M-100, se pueden apreciar en el cuadro No. 4.22 y en la figura No. 4.10, en donde se observa que se obtiene el mayor VAN en los años 10 a 11 en la que es un indicador más sobre la vida del equipo y el momento en el que nos permitiría plantear el posible reemplazo del equipo.

Los valores obtenidos para nuestro caso, según la pendiente de la recta, el incremento anual del costo de operación es de 1.153 \$/hora. Por lo tanto si se continúa utilizando el equipo los costos de operación cada vez serán mayor y crecientes.

Cuadro No. 4.22

Cálculo del VAN sobre el margen del costo de operación del Volquete M-100.

No. Años	Costo de Operación US\$/hora	Diferencia acumulada	Cm	Factor de actualización $(1 + 0.18)^n$	Flujo (+) por año	Flujo actual acumulado	Flujo Neto
1	36,299	1,153	1,153	0,847458	0,977119	-0,175881	-0,175881
2	37,452	2,305	1,729	0,718184	1,655415	0,903534	0,451767
3	38,604	3,458	2,305	0,608631	2,104646	2,431846	0,810615
4	39,757	4,610	2,882	0,515789	2,377787	4,233466	1,058367
5	40,909	5,762	3,458	0,437109	2,518623	6,175989	1,235198
6	42,061	6,915	4,034	0,370432	2,561534	8,161290	1,360215
7	43,214	8,067	4,610	0,313925	2,532433	10,117557	1,445365
8	44,366	9,220	5,186	0,266038	2,452872	11,994179	1,499272
9	45,519	10,372	5,762	0,225456	2,338430	13,756414	1,528490
10	46,671	11,525	6,339	0,191064	2,202018	15,382177	1,538218
11	47,824	12,677	6,915	0,161919	2,052648	16,858615	1,532601
12	48,976	13,829	7,491	0,137220	1,897609	18,180050	1,515004
13	50,128	14,982	8,067	0,116288	1,742223	19,346048	1,488158
14	51,281	16,134	8,644	0,098549	1,589988	20,359845	1,454275
15	52,433	17,287	9,220	0,083516	1,443742	21,227353	1,415157
16	53,586	18,439	9,796	0,070776	1,305044	21,956193	1,372262
17	54,738	19,592	10,372	0,059980	1,175127	22,555081	1,326769
18	55,891	20,744	10,948	0,050830	1,054427	23,033295	1,279627
19	57,043	21,896	11,525	0,043077	0,943206	23,400311	1,231595

Fuente: Elaboración propia

BIBLIOGRAFIA

ADUVIRE PATACA, O., LOPEZ JIMENO, C., CALVO, G. (1990)

“Influencia del mantenimiento en la vida de equipos de transporte en minería a cielo abierto” II Simposium Nacional de Selección de Maquinaria e Industrias de construcción. Madrid – España.

ADUVIRE PATACA, O., LOPEZ JIMENO, C. MAZADIEGO, L. F. (1991)

“Estudio de reemplazo de equipos pesados en minería a cielo abierto”, III congreso Nacional de Ingeniería. Madrid – España.

ALVARGONZALES, V., GALLEGO, A., IZAGUIRRE, J. (1987)

“Renovación de maquinaria en explotaciones a cielo abierto”, I Simposium Nacional de Selección de Maquinaria en Minería y Obras Públicas. Madrid - España.

ANON, (1983).

“Safety in the use and maintenance of large mobile surface mining equipment” Bureau of mines. Washington (USA).

ANON, (1970)

“How much repairs really cost” Rev. Mining Engineering Vol. 22, No.7.

BALDIN, A. (1986).

“Identificación de los puntos críticos y selección de las políticas de mantenimiento” Rev. Mantenimiento, No.17.

BOYD, JAMES F. (1973)

“Three point maintenance program assures maximum equipment availability at salt mine” Eng. Mining J. Vol. 174, No.8.

BURNS, P. (1980)

“Replacement analysis” Rev. Management Accounting.

CHADWICK, JOHN R. (1983)

“Equipment maintenance, major share of mining costs” World Mining, San Francisco USA.
Vol 36, No.7.

CUESTA, A. M. (1987)

“Fiabilidad, mantenimiento, mantenibilidad y apoyo logístico al mantenimiento” Rev.
Mantenimiento, No. 22, Barcelona.

CUTTS, A., JARVIS, E. (1988)

“Machine maintenance – the theory and practice” Colliery Guardian, Vol 236, No.8.

D’AVERSA, J. S., SHAPIRO, J. F. (1978)

“Optimal machine maintenance and replacement by linear programming and
enumeration” MIT Cambridge, Rev. Oper. Soc., Vol. 29. No. 8.

DOUGLAS, JAMES (1990)

“Cuando reemplazar los equipos” Rev. Potencia, No. 315, Madrid.

DRINKWATER, R. W., HASTINGS, N. A. (1967)

“An economic replacement model” Rev. Operational Research Quarterly, Vol 18, No. 121.
Londres.

FAIR, ERNEST W. (1974)

“Before you buy, What about maintenance cost?” Rev. Chemical Engineering, Vol 4.

FERNANDEZ POOL, M. (1988)

“El mantenimiento planificado en la maquinaria minera” VIII Congreso Internacional de
Minería y Metalurgia. Oviedo,

GARCIA, S. C. (1988)

“La planificación en el mantenimiento función de la gestión” Rev. Mantenimiento, No 27
Barcelona.

GOLDING, G. (1986)

“Manging maintenance by team approach” Min. Tecnol., Vol 68, No. 787.

JARVIS, E. (1986)

“Improving maintenance by routine condition monitoring” Colliery Guardian, Col. 234,
No.8.

JARDINE A. K. S. (1981)

“Maintenance, Replacement, an realiability” Ontario, Canada.

LAMBE, T. A. (1974)

“The decision to repair or scrap machines” Rev. Operational Research Quearterley, Vo. 25,
No. 99., Londres.

LOPEZ, L, QUEZADA, F. (1964)

“Sustitución Planeada de Equipos” Finanzuto S.A. Madrid.

MANGLANO, S. (1969)

“Organización del mantenimiento” Interbetong, Madrid.

MONTERO, J. (1985)

“Organización para la implantación del mantenimiento preventivo” Rev. Mantenimiento,
No.8 Barcelona.